DIE NATURWISSENSCHAFTEN

Vierzehnter Jahrgang | 12. März 1926 | Heft 11

EMIL WARBURG

ZUR FEIER

SEINES ACHTZIGSTEN GEBURTSTAGES

*

Inhalt:

	Seite
Emil Warburg zum achtzigsten Geburtstage. Von E. Grüneisen, Berlin-Charlottenburg	203
Emil Warburg und die Technik. Von H. Schering, Berlin	208
Der Wirkungsquerschnitt bei atomaren Stoßprozessen. Von J. Franck, Göttingen	211
Zur quantenhaften Lichtabsorption in festen Körpern. Von Robert Pohl, Göttingen	214
Beitrag zur Erklärung der „Subelektronen". Von Erich Regener, Stuttgart	219
Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes	222

Emil Warburg

zum achtzigsten Geburtstage.

Von E. Grüneisen, Berlin-Charlottenburg.

Am 9. März vollendet Emil Warburg das achte Jahrzehnt eines ebenso an Mühe und Arbeit wie an Erfolgen reichen Lebens, ein Ereignis, das nicht allein von dem großen Kreise derer, die ihm persönlich näher stehen, dankbar und festlich begangen werden wird, sondern auch der Gesamtheit der Physiker im In- und Ausland ein Anlaß sein mag, der wissenschaftlichen Fortschritte zu gedenken, die sich an den Namen unseres Jubilars knüpfen. Vor wenigen Jahren bereits, als Warburg sein Amt als Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt niederlegte, ist seiner Bedeutung als Forscher und Lehrer gedacht worden[1]). Wenn wir hier etwas vollständiger auf Warburgs Lebensgang und Wirken eingehen, so hoffen wir damit einen Beitrag auch für die Entwicklungsgeschichte unserer Wissenschaft zu liefern, die um so verständlicher wird, je tiefer man in die Entwicklung der Persönlichkeiten einzudringen vermag, die den Anstoß zu großen Fortschritten gaben.

Warburg stammt aus Altona a. E. Obwohl als Kind von zarter Gesundheit — was niemand glauben würde, der dem Achtzigjährigen barhäuptig bei Wind und Wetter begegnet — legte er die Schuljahre rasch zurück. Zuerst in kaufmännischer Schule, dann durch Privatstunden auf das Gymnasium vorbereitet, trat er sogleich in die Tertia des Christianeums in Altona ein, wo er das Glück hatte, angenehme Verhältnisse vorzufinden. Besonders interessierte ihn der griechische Unterricht. Viel bedeutungsvoller aber für seine weitere Entwicklung wurden die Stunden bei seinem Mathematiklehrer Lübsen, von dem er oft mit Verehrung spricht und aus dessen Büchern er sich noch jetzt Rat holt.

Schon mit 17 Jahren, 1863, bezog Warburg die Universität Heidelberg, um *Chemie* zu studieren. Man könnte ihn darum beneiden, wenn man sich klar macht, daß er dort Bunsen, Helmholtz und Kirchhoff hören konnte, und nicht nur konnte, sondern auch wirklich hörte, wie z. B. ein von ihm ausgearbeitetes Kollegheft von Bunsens Vorlesung beweist. Da Warburg in die Burschenschaft Alemannia eingetreten war, so wird es ihm nicht immer leicht gewesen sein, die Verpflichtungen gegen Professoren und Burschenschaft miteinander zu vereinen. Wie dem auch sei, er gewann, wohl unter dem großen Eindruck von Kirchhoffs „vollendet schöner" Vorlesung über Experimentalphysik und weil es seiner mathematischen Begabung mehr entsprach, die Überzeugung, zum *Physiker* geboren zu sein. Und so ging er 1865 nach Berlin und trat in das Laboratorium von Magnus ein, eins der wenigen, die es damals in Deutschland gab[1]).

Warburgs Einführung in die Experimentierkunst lag in guten Händen. Denn neben Magnus wirkte als Assistent des Laboratoriums Kundt, der damals gerade seine berühmte Staubfigurenmethode gefunden hatte. Mit ihm verband Warburg bald eine Freundschaft, die von großer Bedeutung werden sollte. Wenn Warburg selbst erzählt[2]), damals habe im Magnusschen Laboratorium die Meinung bestanden, daß alle großen Entdeckungen von Faraday vorweggenommen seien und daß es sich für die Epigonen nur um den weiteren Ausbau handeln könne, und wenn er weiter berichtet, daß ihnen die Poissonsche Theorie der Elastizität als abschreckendes Beispiel für das damals diskreditierte Arbeiten mit der atomistischen Hypothese vorgehalten worden sei, so hat man fast den Eindruck, als sei der Einfluß von Magnus auf seine Schüler etwas entmutigend gewesen. Die Absicht war aber jedenfalls nur, in den angehenden Forschern die Überzeugung zu erwecken, „daß das Gebäude der Wissenschaft lediglich auf dem Boden beobachteter Tatsachen unabhängig von allen metaphysischen Sätzen zu errichten sei" und daß nur aus Beobachtungen sich die Begreiflichkeit der Naturerscheinungen ergeben könne. Die Empfehlung dieser Grundsätze hat denn auch Warburg nie gehindert, die jeweils modernen Theorien aufs aufmerksamste zu verfolgen, sie kritischer Prüfung zu unterziehen und durch entscheidende Experimente zu fördern oder zu widerlegen.

Warburgs erste Abhandlungen, darunter auch die lateinisch geschriebene Dissertation, auf Grund deren er am 30. März 1867 zum Doktor promoviert wurde, betrafen akustische Probleme. Der experimentelle Kunstgriff, durch den es ihm gelang, in

[1]) A. Einstein, Naturwissenschaften 10, 823. 1922; E. Gehrcke, Zeitschr. f. techn. Physik 3, 186. 1922; G. Gehlhoff, Zeitschr. f. techn. Physik 3, 193. 1922. An den beiden erstgenannten Stellen finden sich auch Verzeichnisse der Veröffentlichungen Warburgs bis zum Jahre 1921.

[1]) Siehe F. Kohlrausch, Vorwort zur 11. Aufl. seines Lehrbuches der praktischen Phys. 1910.

[2]) E. Warburg, Helmholtz als Physiker. Karlsruhe 1921.

weichen Stoffen Schallschwingungen zu erzeugen, um ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu messen, nämlich die Koppelung des stark gedämpften mit einem schwach gedämpften Oszillator, ist das mechanische Analogon zu der später so wichtig gewordenen Methode, elektromagnetische Schwingungen in einer stark gedämpften Antenne zu erzeugen. WARBURG findet, daß tonverändernde und dämpfende Wirkung im Falle der Resonanz durch ein Maximum gehen. Weiterhin interessieren ihn die Reibungskräfte im festen Körper, welche die Dämpfung der Schwingungen hervorrufen. Es gelingt ihm, zu zeigen, daß bei gleicher Wellenlänge langsamere Schwingungen stärker gedämpft werden als raschere, was man auch wegen des Vorhandenseins der elastischen Nachwirkung erwarten könne.

Ein damals sehr überraschendes Ergebnis brachten WARBURGS Versuche über den Ausfluß des Quecksilbers aus gläsernen Capillaren. Sie zeigten, daß selbst bei fehlender Benetzung die der Glaswand benachbarte Flüssigkeitsschicht nicht gleitet, sondern gegenüber der Wand ruht. Die vom 5. April 1870, nach MAGNUS Tode, datierte Arbeit diente wohl zur Habilitation, die am 20. März 1870 in Berlin stattfand. Sie zeigt bereits ebenso wie ihre Vorgängerinnen das für WARBURG charakteristisch gebliebene Bestreben, die von ihm aufgegriffenen Probleme experimentell und theoretisch vollständig durchzuarbeiten und in allen Einzelheiten klarzustellen. Gelang dieses nicht, so blieb die Aufgabe für später vorbehalten.

Nach einer unfreiwilligen Pause — WARBURG nahm am deutsch-französischen Kriege als Einjährig-Freiwilliger beim 2. Garderegiment z. F. teil und kehrte mit dem Eisernen Kreuz dekoriert als Offizier zurück — finden wir den jungen Privatdozenten wieder in Berlin bei einer Untersuchung über die Zerstreuung der Elektrizität in Gasen, dem Vorläufer zahlreicher späterer Arbeiten über Entladungserscheinungen in Gasen. Jedoch schon am 13. September 1872 wird der 26jährige mit dem Extraordinariat für Physik in Straßburg betraut. Das Wertvollste an der Berufung war vielleicht die Wiedervereinigung mit KUNDT. Denn sie regte beide Freunde zu ihren gemeinsamen berühmten Untersuchungen über die kinetische Theorie der Gase an. Es gelingt ihnen mittels der KUNDTschen Methode der Schallgeschwindigkeitsmessung der Nachweis (1875), daß bei wirklich einatomigen Gasen, wie Quecksilberdampf, die Atomwärme den von der kinetischen Theorie geforderten Wert $^3/_2$ R besitzt (R = Konstante der Gasgleichung). Des weiteren dehnen sie (1875) ihre Untersuchungen aus auf die Reibung und Wärmeleitung von Gasen bis zu solchen Verdünnungen, wo die mittlere Weglänge der Moleküle nicht mehr gegen die Abmessungen der Gasräume zu vernachlässigen ist. In diesem Falle müßte, wie KUNDT und WARBURG aus der kinetischen Theorie folgern, ein strömendes Gas an der Wand eine meßbare Gleitung zeigen, und ferner müßte ein Temperatursprung zwischen Wand und Gas merkbar werden, wenn senkrecht zur Wand eine Wärmeströmung erfolgt. Der erste Effekt wurde von KUNDT und WARBURG experimentell nachgewiesen, der Temperatursprung vorläufig nur insofern, als gezeigt wurde, daß bei sehr kleinen Drucken die Wärmeleitung des Gases nicht mehr unabhängig vom Druck ist, sondern abnimmt, was aber, wie richtig erkannt wird, keineswegs nur auf den Temperatursprung zurückzuführen ist. „Es war das erste Mal", sagt EINSTEIN[1]) über diese Arbeiten, „daß auf Grund der molekularen Theorie der Wärme ein neues Phänomen vorausgesagt worden war, und zwar ein Phänomen, dessen Darstellung auf Grund der kontinuierlichen Auffassung der Materie so gut wie ausgeschlossen war." Die Messung des Temperatursprunges Wand—Gas ließ WARBURG 1898—1900 in seinem Laboratorium durch v. SMOLUCHOWSKI und GEHRCKE nachholen.

Nur kurz war die Straßburger Zeit, die übrigens durch die Freundschaft mit dem damaligen Assistenten RÖNTGEN eine weitere Bereicherung für WARBURG brachte. Schon im Januar 1876 wurde er ordentlicher Professor der Physik in Freiburg i.B., und damit trat zunächst die Lehrtätigkeit in den Vordergrund. WARBURGS Vorlesung über Experimentalphysik ist weit über den Kreis seiner eigentlichen Hörer hinaus bekannt geworden; denn ihr wesentlicher Inhalt ist in dem 1893 erschienenen Lehrbuch der Experimentalphysik für Studierende, dessen 15./16. Auflage 1919 herauskam, niedergelegt. Das Buch ist ein Muster knapper und doch klarer Ausdrucksweise. Jeder Satz ist bis aufs letzte Wort durchdacht. Dadurch ist freilich für den Anfänger die Lektüre nicht immer leicht, um so mehr aber werden sich ihm die Sätze einprägen, wenn er darüber nachgedacht hat. Ähnlich wie das Buch war WARBURGS durch treffliche Experimente gewürzte Vorlesung.

Eine lange Reihe von Abhandlungen aus den Freiburger Jahren zeigt uns WARBURG auf den verschiedensten Gebieten der Physik als Pfadfinder. Ausgehend von Problemen, die für die Atomistik des festen Zustandes Aufklärung versprachen — gleitende Reibung fester Körper, elastische Nachwirkung u. a. — stößt er auf die Frage nach der zyklischen Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe. Er entdeckt (1880) die später (von EWING) sog. Hysteresisschleife und beweist, daß ihr Flächeninhalt eine Arbeit darstellt, welche bei der zyklischen Magnetisierung aufgewandt wird und als Hysteresiswärme im Ferromagnetikum erscheint. Diese Entdeckung gehört zu den bedeutendsten Leistungen WARBURGS, ist doch die Berücksichtigung und möglichste Beseitigung der Hysteresisverluste eins der wichtigsten Probleme der Elektrotechnik geworden. Wie WARBURG einmal erzählte, ist ihm der entscheidende Gedanke für seine Entdeckung auf der Hochzeitsreise gekommen.

Aus der Freiburger Zeit erwähnen wir noch die

[1]) a. a. O.

Untersuchungen über die Viscosität der Gase und Flüssigkeiten unter hohen Drucken, über die Elektrolyse des Glases (Wanderung von Na- oder auch Li-Ionen durch die Masse des Glases), ihre technische Verwertung zur Einführung reinen Natriums in evakuierte Röhren, wodurch zum ersten Male die Untersuchung sehr reiner Gase ermöglicht wurde; ferner über die Elektrolyse des Quarzes parallel zur Achse, sein hohes Isolationsvermögen senkrecht dazu.

Um die gleiche Zeit (1887) erschien WARBURGS erste große Arbeit über elektrische Entladungen in Gasen, ein Thema, zu dem er immer wieder zurückgekehrt ist oder seine Schüler angeregt hat. Damals gehörte das noch ganz unverständliche Gebiet der Glimmentladung zu den experimentell am schwersten zugänglichen, wie ein Blick in die Originalabhandlungen jener Zeit beweist. Dank seiner Methode der Reinigung von Gasen (Entfernung der Wasserhaut des Glases und Einführung von reinem Natrium), gelang es WARBURG, das „normale Kathodengefälle" in Abhängigkeit vom Kathodenmaterial und vom Gas zuverlässig zu messen und insbesondere festzustellen, daß es vom Druck des Gases unabhängig ist. Hiermit hat WARBURG, wie GEHRCKE[1]) sagt, „ein quantitatives Gesetz aufgefunden, das sich dem vorher schon von HITTORF gefundenen Gesetze der Unabhängigkeit von der Stromstärke an die Seite stellte und lange Zeit zu den ganz wenigen sicheren, wenn auch unverstandenen Gesetzmäßigkeiten der Glimmentladung gehörte."

Auch in das damals stürmisch sich entwickelnde Gebiet der physikalischen Chemie griff WARBURG experimentell und theoretisch ein mit seinen Untersuchungen über die galvanische Polarisation, die ihn später noch öfter beschäftigt hat, und über die Theorie des Capillarelektrometers, für welches er eine andere, auf der Ausscheidung der Ionen im elektrisch neutralen Zustand beruhende, Erklärung gab als HELMHOLTZ, sowie über den elektrischen Widerstand äußerst schwach leitender Flüssigkeiten, die erst nach „elektrischer Reinigung" dem OHMschen Gesetz folgen.

Wenn nach KUNDTS Tode WARBURG im Jahre 1895 an die Universität Berlin berufen wurde, so liegt hierin der sicherste Beweis für das hohe Ansehen, dessen er sich bei seinen Fachgenossen zu erfreuen hatte. Der Wechsel aus der schönen Freiburger Existenz nach dem inmitten der Großstadt liegenden Berliner Institut wurde ihm und seiner Familie nicht leicht. Vor allem aber stellte die damals noch ungeteilte Berliner Professur für Experimentalphysik durch Verwaltungsgeschäfte, Prüfungen usw. viel höhere Anforderungen an seine Arbeitskraft. Was ihn für alle unerquicklichen Verhältnisse etwas entschädigte — auch die Beziehungen zur Regierung konnten besser sein — das war neben dem wissenschaftlichen und freundschaftlichen Austausch mit bedeutenden Fachgenossen die Freude an der mit zäher Energie weiter betriebenen eigenen wissenschaftlichen Forschung und an dem Zusammenwirken mit den zahlreichen aus dem In- und Ausland seinem Institut zuströmenden jungen Physikern. Die meisten unter ihnen erhielten von WARBURG selbst ein Thema zur Bearbeitung, und so konnte er eine Menge von Fragen, die ihm am Herzen lagen, der Lösung näher bringen lassen[1]). Dabei war es sein Prinzip, die Doktoranden möglichst selbständig arbeiten und durch alle Schwierigkeiten sich zunächst allein hindurchfinden zu lassen. Es sind hier wohl einige Worte darüber am Platze, wie WARBURG auf seine Schüler einwirkte. Selbstverständlich durch manchen guten Rat, um den man ihn jederzeit angehen durfte, hauptsächlich aber durch sein Beispiel: strengste Pflichterfüllung, unermüdlicher Fleiß, sorgfältiges und kritisches Experimentieren, Beherrschung der theoretischen Grundlagen, Kenntnis der Literatur, guter Vortrag, klare Schreibweise wurden auch von den Doktoranden erwartet. Gelegenheit, solche Eigenschaften zu beweisen, boten die täglichen Besuche WARBURGS mit der oft peinlichen einleitenden Frage: „Wie steht's, haben Sie was Neues?" oder das physikalische Kolloquium, das WARBURG, dem Vorbilde seines Lehrers MAGNUS folgend, wöchentlich selbst abhielt und durch seine erstaunliche Literaturkenntnis, die sich ja in all' seinen Arbeiten zu erkennen gibt, vielseitig und anregend zu gestalten wußte. Der Kreis der Teilnehmer war damals viel geringer als jetzt, so daß auch die Anfänger zu Referaten herangezogen wurden. Einmal im Sommer überraschte WARBURG die Besucher des Kolloquiums durch die Aufforderung, statt im Wirtshaus die Nachsitzung zu halten, den Abend bei ihm und seiner liebenswürdigen Frau im „Garten" des Instituts bei Lampionsbeleuchtung zu verbringen. Diesem Rufe folgten die Koryphäen der Berliner Physik — KOHLRAUSCH, VAN T'HOFF, PLANCK, RUBENS, LUMMER usw. — ebenso gern, wie die jungen Studenten, die stolz darauf waren, mit jenen zusammen geladen zu sein.

Neben der eigentlichen Berufstätigkeit hatte WARBURG noch andere mit Zeit- und Kraftaufwand verbundene Ehrenpflichten zu erfüllen, von denen wir nur die Mitgliedschaft in der Akademie der Wissenschaften zu Berlin und den Vorsitz in der Physikalischen Gesellschaft erwähnen wollen, den WARBURG 8 Jahre hindurch ununterbrochen innehatte. Während dieser Zeit (1899) erfolgte die Umwandlung der Berliner in eine Deutsche Physikalische Gesellschaft, deren rasches Aufblühen am deutlichsten die Richtigkeit jener Maßnahme beweist. Ihrer Dankbarkeit gab die Gesellschaft dadurch Ausdruck, daß sie WARBURG gelegentlich seines siebzigsten Geburtstages zu ihrem Ehrenmitgliede wählte.

Trotz der starken Belastung mit Amtsgeschäften aller Art zwang sich WARBURG die Zeit zu viel-

[1]) a. a. O.

[1]) Wie GEHLHOFF a. a. O. berichtet, sind während der 10jährigen Amtszeit WARBURGS 225 Abhandlungen aus dem Berliner Institut veröffentlicht worden.

seitiger eigener Forschung ab. Die galvanischen Polarisationserscheinungen wurden im Anschluß an seine früheren Arbeiten von ihm und seinen Schülern weiter untersucht. Mit den Arbeiten über den Durchgang der Kathodenstrahlen durch Metalle und den dabei auftretenden Geschwindigkeitsverlust (1902) sowie über ihre Reflexion an dünnen Metallblättchen trug WARBURG mit einigen Schülern zur Lösung der Frage bei, welcher Art die Wechselwirkung bewegter Elektronen mit den auf sie wirkenden Teilchen im festen Körper sei.

Die meiste Zeit aber verwandte WARBURG auf die Durchforschung eines neuen Gebietes, in dem er von einem Problem folgerichtig zum anderen geführt, schließlich wieder eine seiner bedeutendsten Leistungen, die Feststellung des Energieumsatzes bei photochemischen Vorgängen in Gasen, vollbrachte. Es ist interessant, die Entwicklung dieser Arbeiten von einem scheinbar abgelegenen Punkte aus zu verfolgen. Im Jahre 1896 beschäftigt sich WARBURG mit der Wirkung des Lichtes auf die *Funkenentladung*. Dieser geht ein schwacher Stromübergang voraus, und die Wirkung des Lichtes besteht in der Abkürzung dieser Vorperiode oder Verzögerung. Diese fehlt bei der *Spitzenentladung* gegen eine Platte, die WARBURG auch deshalb näherer Untersuchung für wert hält, weil die Leuchterscheinung beim stationären Strom und wahrscheinlich auch die Ionenbildung nur an der Spitze auftritt, außerhalb des Leuchtbereiches also wahrscheinlich nur die *eine* Ionenart im Gase sich bewegt, welche das Vorzeichen der Spitzenladung besitzt, ein für die Aufklärung des Vorganges sicherlich günstiger Umstand. Alles wird messend verfolgt, quantitative Gesetze des Stromes zwischen Spitze und Platte werden aufgestellt. Im Jahre 1900 veröffentlicht WARBURG seine erste Abhandlung über die *Bildung des Ozons* bei der Spitzenentladung, und seitdem konzentriert sich sein Interesse ganz allgemein auf chemische Reaktionen, welche in gasförmigen Körpern durch die *„stille Entladung"* herbeigeführt werden, d. i. nach WARBURG eine Entladung, welcher ein Leitwert kleinerer Größenordnung zukommt als der Glimm- oder gar Bogenentladung. Die hier auftretenden Fragen nach der Entstehung des Ozons, nach dem Gleichgewicht zwischen Ozonisierung und Desozonisierung, nach der Ausbeute bei verschiedenen Formen der Entladung usw. quantitativ zu beantworten und die dazu nötigen neuen Meßmethoden zu schaffen, wobei WARBURG vielfach von LEITHÄUSER unterstützt wurde, erforderte ein bedeutendes experimentelles Geschick. Wir müssen uns versagen auf Einzelheiten einzugehen und verweisen auf WARBURGS eigenen Bericht[1]).

Der Befund, daß der Herd der Ozonbildung im leuchtenden Teil der Entladungsstrecke liegt, im Verein mit der Tatsache, daß nach LENARD Ozon auch durch äußerst kurzwelliges ultraviolettes Licht gebildet wird, stellte WARBURG vor die Frage, ob die Ozonbildung bei der stillen Entladung auf ultravioletter Strahlung beruhen könne. Manches sprach dagegen, z. B. ist die Ausbeute bei stiller Entladung viel größer, als sie bisher bei anderer Lichtquelle zu erzielen war. Gleichwohl wandte sich WARBURG nun (1907) den *chemischen Wirkungen des Lichtes* zu, die vor denen der stillen Entladung den großen Vorteil boten, daß das wirksame Agens unverändert bleibt, wenn man das beeinflußte Gas unter andere Bedingungen bringt.

Während bei älteren photochemischen Arbeiten mit den chemischen Bestimmungen höchstens relative Strahlungsmessungen verbunden waren, kam es WARBURG darauf an, den photochemischen Energieumsatz quantitativ aufzuklären. Hatte doch EINSTEIN vor kurzem in Erweiterung der PLANCKschen Quantentheorie ein Gesetz aufgestellt, wonach erstens Strahlung von der Frequenz ν stets quantenweise, nämlich im Betrage $h\nu$ (h = PLANCKsche Konstante), von der absorbierenden Molekel aufgenommen werden und zweitens jede in dieser Weise photochemisch beanspruchte Molekel Spaltung oder Umlagerung erfahren sollte. Die Prüfung dieses Gesetzes erforderte die Messung der absorbierten Strahlungsenergie und der Anzahl Mole, welche bei dieser Absorption nach Ablauf der primären und sekundären chemischen Prozesse zersetzt oder umgewandelt sind. Diese beiden schwierigen Messungen zum ersten Male miteinander durchgeführt zu haben, ist WARBURGS großes Verdienst. Er kommt zu dem Ergebnis, daß zwar die quantenweise Absorption der Strahlung als „photochemisches Grundgesetz" anzuerkennen ist, der zweite Teil des EINSTEINschen Gesetzes jedoch höchstens in einzelnen einfachen Fällen (HJ, HBr), aber keineswegs allgemein gilt. Und zwar werden nach WARBURG die beanspruchten Molekeln oder ein Teil derselben deshalb nicht gespalten oder umgelagert, weil entweder $h\nu$ kleiner ist als die hierzu erforderliche Arbeit, oder Energie während des Absorptionsaktes abgegeben wird[1]).

Über die Beziehungen zwischen den chemischen Wirkungen der stillen Entladung, die WARBURG neuerdings wieder aufgenommen hat, und denen der Strahlung kommt er zu dem Ergebnis, daß beide zwar nahe verwandt sind, daß aber im ersten Falle die Wirkung größtenteils auf Elektronen- und Ionenstoß beruht. Die Molzahl, welche beim Durchgang der Elektrizitätsmenge 1 Coulomb durch ein Gas zersetzt wird, ergibt sich für verschiedene Gase von gleicher Größenordnung.

Die photochemischen Untersuchungen hat WARBURG schon nicht mehr im Berliner Physikalischen Institut, sondern in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ausgeführt, deren Leitung er i. J. 1905 als Nachfolger FRIEDRICH KOHL-

[1]) E. WARBURG, Jahrbuch d. Rad. u. Elektr. **6**, 181. 1909.

[1]) Man vergleiche außer den Originalabhandlungen den zusammenfassenden Bericht WARBURGS auf der 88. Naturforschertagung zu Innsbruck, diese Zeitschr. **12**, 1058. 1924.

RAUSCHS übernahm. Nach der starken Überanstrengung im Berliner Amt empfand WARBURG die Berufung nach Charlottenburg als Erlösung. Auf der anderen Seite ist es ihm zuerst nicht leicht geworden, sich in die Arbeitsweise der Reichsanstalt hineinzufinden. Er liebt im Grunde die freie Forschung, unbekümmert darum, ob sie später technische Bedeutung gewinnen wird. Er liebt es, der Wissenschaft neue Pfade zu erschließen, wobei zunächst orientierende Messungen zu genügen pflegen. Zu den Aufgaben der Reichsanstalt aber gehören neben der freien physikalischen Forschung, die er selbstverständlich mit besonderem Interesse verfolgte und durch Gedankenaustausch befruchtete, auch solche Arbeiten, welche die Technik unmittelbar zu fördern oder bekannte Pfade auszubauen bestimmt sind. Solche Arbeiten — wir brauchen nur an die Festlegung der physikalischen Maßeinheiten zu erinnern — können ein hohes Maß von Entsagung erfordern, wie jeder weiß, der sich bemüht hat, eine physikalische Konstante wesentlich genauer festzustellen als seine Vorgänger. Indem WARBURG mit der ihm eigenen Gewissenhaftigkeit sich auch in diese speziellen Reichsanstaltsaufgaben vertiefte, stieg sein Interesse für sie, und er kam zu vollem Verständnis und hoher Anerkennung für ihre sorgfältige Durchführung. Daß er sich auch selbst nicht scheute, solche Aufgaben zu übernehmen, beweist u. a. die mühsame, mehrere Jahre beanspruchende Neubestimmung der Konstante c des WIEN-PLANCKschen Strahlungsgesetzes gemeinsam mit LEITHÄUSER, HUPKA und MÜLLER. Es würde zu weit führen, hier auf alle Anregungen einzugehen, die WARBURG in ähnlicher Richtung der Reichsanstalt gegeben hat. Erwähnt seien nur die Vorschläge zur Schaffung einer rationellen Lichteinheit, zur Aufnahme der Röntgendosismessungen und zur Neubestimmung der absoluten Widerstandseinheit. Über die Art, wie er seine Untergebenen wissenschaftlich zu beeinflussen suchte, hat er sich selbst gelegentlich geäußert. Er hielt es einerseits „nicht für zweckmäßig, die Aufgaben der Anstalt scharf zu formulieren und dadurch vielleicht die Behandlung aktueller und unvorhergesehener Probleme, für welche sie vermöge ihrer apparativen Ausstattung und ihrer personellen Kräfte geeignet scheint, auszuscheiden", andererseits gab er die allgemeine Richtung an und versuchte, „die Kräfte nicht in der Behandlung kleiner Aufgaben zu zersplittern, sondern zur Erreichung größerer Ziele zusammenzufassen." Wenn man die steigende wissenschaftliche Produktion der Reichsanstalt während der achtzehnjährigen Präsidentschaft WARBURGS betrachtet, so darf man wohl sagen, daß ihm der Erfolg recht gegeben hat.

Eine der wichtigsten Maßnahmen WARBURGS zur Hebung der Produktivität der Reichsanstalt war ihre Neuorganisation. Während sie früher eine wissenschaftliche und eine technische Abteilung hatte, die vielfach ohne rechte Fühlung an ähnlichen Aufgaben arbeiteten, hob WARBURG diese Trennung auf und schuf je eine Abteilung für Optik, Elektrizität und Magnetismus, Wärme und Druck, deren jede nun unter einheitlicher Leitung Doppelarbeit vermied. Ferner gelang es ihm, der Reichsanstalt eine ganze Reihe wertvollster Erweiterungen zu verschaffen, wobei ihm die guten Beziehungen zum vorgesetzten Ministerium wie auch zu maßgebenden Persönlichkeiten der Industrie, die zum Teil seine Schüler waren, zustatten kamen. Wir nennen den Neubau des Starkstromgebäudes und des störungsfreien Zweiglaboratoriums in Potsdam, die Neugründung des wärmetechnischen und Kälte-Laboratoriums sowie der Laboratorien für Radioaktivität und Röntgentechnik.

Als WARBURG im Jahre 1922 sein Amt als Präsident der Reichsanstalt niederlegte, war es so umfangreich geworden, daß auch hier wieder sein Nachfolger eine besondere Hilfskraft forderte, ein Beweis für die erstaunliche Leistungsfähigkeit, die sich unser Jubilar bis in sein hohes Alter bewahrt hat. Das Amt gab er auf, aber nicht die Arbeit. Wenn nicht körperliche Beschwerden, an denen die letzten Jahre leider reich waren, es ihm unmöglich machen, arbeitet er in seinem Reichsanstaltslaboratorium oder daheim an seinem Schreibtisch. Daß er sich wieder den chemischen Wirkungen der stillen Entladung zugewandt hat, wurde bereits erwähnt. Die Früchte seiner Arbeit hat er mehrfach in ausgezeichneten Vorträgen auf den großen Herbsttagungen der deutschen Physiker mitgeteilt. Viele eigene Ergebnisse hat er auch in dem kleinen Buch „Über Wärmeleitung und andere ausgleichende Vorgänge" (Berlin 1924) niedergelegt.

So steht EMIL WARBURG noch mitten im wissenschaftlichen Leben als der Mann, „der durch die Zuverlässigkeit und Vielseitigkeit seiner wissenschaftlichen Leistungen, durch die Unbestechlichkeit seines Urteils, durch sein stetes Interesse für neue Tatsachen und neue Ideen sich außer dem Danke und der Anerkennung vor allem auch das Vertrauen der deutschen Physiker in seltenem Maße erworben hat, und gerade derjenigen unter ihnen, die angesichts der vielen überraschenden Neuerungen, welche die Forschung gegenwärtig bringt, um die Sicherheit und Stetigkeit des Fortschrittes der Wissenschaft etwas besorgt sind." Diese Worte aus der Urkunde[1]), durch die ihm die Ehrenmitgliedschaft der Deutschen Physikalischen Gesellschaft vor zehn Jahren bestätigt wurde, gelten wie damals so heute.

[1]) Verhandl. d. dtsch. phys. Ges. 18, 236. 1916.

Emil Warburg und die Technik.

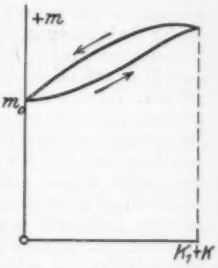
Von H. SCHERING, Berlin.

Wie WARBURG, der Mann der reinen Wissenschaft, über die Beziehungen zwischen Wissenschaft und Technik dachte, hat er in einer Rede gelegentlich der Eröffnung des an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt neuerbauten Starkstromlaboratoriums am 8. März 1914[1]) zum Ausdruck gebracht: „In ihren ureigensten Zielen fördern sich Wissenschaft und Technik gegenseitig, indem die neuen Wege von der Wissenschaft traciert und alsdann von der Technik zu breiten und bequemen Straßen umgeschaffen werden, auf welchen die Wissenschaft bisher unbekanntes Terrain leichter erreicht".

In physikalisches Neuland ist WARBURG in den verschiedensten Richtungen eingedrungen, in Richtungen, die jeweils im Vordergrunde des allgemeinen physikalischen Interesses lagen; eine Reihe dieser Pfade hat dann die Technik — oft erst nach langen Jahren — mit Nutzen für ihren Ausbau verwendet. Von weittragendster Bedeutung in dieser Hinsicht ist die Entdeckung der magnetischen Hysteresis, die WARBURG 1880[2]) in Freiburg machte, und die einer der Grundpfeiler der Elektrotechnik geworden ist. Wie scharf WARBURG das Problem faßte und wie klar er das Wesentliche erkannte, mögen zwei Sätze aus dem Eingang der fundamentalen Arbeit in den Annalen 1881 zeigen:

„Man habe einem Eisendraht durch eine longitudinal-magnetisierende Kraft K_1 ein gewisses magnetisches Moment m_0 erteilt; läßt man nun auf den Draht magnetisierende Kräfte wirken, die von o bis K_1 stetig wachsen und dann von K_1 bis o wieder stetig abnehmen, so findet man für dieselbe magnetisierende Kraft das magnetische Moment größer, wenn K im Abnehmen, als wenn es im Wachsen begriffen ist". Nach einer Bemerkung, daß diese Tatsache in der Literatur nicht erwähnt sei, aber den mit magnetischen Untersuchungen Beschäftigten wohl nicht unbekannt sein könne, jedoch in ihrer Bedeutung nicht erfaßt sein, fährt er fort: „Die Bedeutung der Tatsache, von welcher die Rede ist, erhellt sogleich folgender Satz: Während die Kraft K von o bis K_1 wächst und von K_1 bis o wieder abnimmt, ist an dem Drahte eine Arbeit geleistet, welche in absolutem Maß durch die an der Kurve C (Tafel I, Fig. 5) umschlossenen Figur dargestellt wird."

1870 untersuchte WARBURG den Ausfluß des Quecksilbers aus gläsernen Capillarröhren[1]) und stellte fest, daß das Quecksilber, obwohl es die Glaswand nicht benetzt, doch nicht an der Glaswand gleitet, die Adsorption verhindert ein völliges Ablösen der Flüssigkeitsschicht von der Wand. In der Technik der Schmierung von Maschinenlagern hatte man gefühlsmäßig die Unterschiede der Schmierfähigkeit verschiedener Öle durch verschiedene Haftfähigkeit an den Metallteilen zu erklären versucht, der WARBURGsche Versuch bewies die Unhaltbarkeit dieser Vorstellung.



Hysteresischleife. Aus Ann. d. Phys. u. Chem. 1881, Tafel I, Fig. 5.

Aus der Arbeit von KUNDT und WARBURG: „Über die Reibung und Wärmeleitung verdünnter Gase" ist der zweite Teil über die Wärmeleitung[2]) für die Technik in mehrerer Hinsicht fruchtbringend gewesen. Die Forderung der Theorie von MAXWELL-BOLZMANN, daß die Wärmeleitfähigkeit von Gasen in einem gewissen Druckbereich vom Druck unabhängig sei, wurde an Luft, Kohlensäure und Wasserstoff bei niedrigen Drucken bis zu einigen Millimetern Quecksilber, also unter Ausschaltung der Konvektion bestätigt und der Störungseinfluß der Konvektion bei Atmosphärendruck, in dessen Umgebung STEFAN gearbeitet hatte, aufgezeigt. Für hohe Verdünnung (Vakua) wurde die Theorie der Wärmeleitung entwickelt, der Temperatursprung an der Wand wurde entdeckt und die Abnahme der Wärmeleitung mit dem Druck abgeleitet. Die bündige experimentelle Nachprüfung der Theorie scheiterte an der Unmöglichkeit, mit den damaligen Einrichtungen hohe Vakua zu erzielen, doch wurde die starke Abnahme der Wärmeleitung mit abnehmendem Druck nachgewiesen. Die mit der Zeit wieder zunehmende Wärmeleitung wurde auf den Wasserdampf zurückgeführt, welcher von den Glaswänden verdampft, der störende Einfluß wurde durch Erhitzen der Apparatteile auf 200° zwar vermindert, aber nicht vollkommen beseitigt. Die luftleeren Glühlampen und die empfindlichen Thermoelemente im Vakuum zur Messung kleiner elektrischer Ströme fußen auf dieser Arbeit. Denjenigen, der mit Vakuumpumpen arbeitet, dürfte es interessieren, daß die bekannte Glasfeder, ein im Zickzack gebogenes Glasrohr, zur Herstellung beweglicher Vakuumverbindungen ohne Gummischlauch in dieser

[1]) Über den Entwicklungsgang der Starkstromtechnik und über deren Beziehungen zur Phys.-techn. Reichsanstalt. Internat. Monatsschr. f. Wiss., Kunst u. Technik 8, 922. 1914.

[2]) Magnetische Untersuchungen, über einige Wirkungen der Koerzitivkraft. Freiburger Ber. 8, 1—30. 1880. Ann. d. Phys. u. Chem., neue Folge 13, 141—164. 1881. Ferner: WARBURG und HÖNIG, Über die Wärme, welche durch periodisch wechselnde magnetisierende Kräfte im Eisen erzeugt wird, Ann. d. Phys. u. Chem., neue Folge 20, 814—835. 1883. Über die magnetische Hysteresis, Elektrotechn. Zeitschr. 10, 193. 1898.

[1]) Pogg. Ann. 140, 367—379. 1870.

[2]) Ann. d. Phys. u. Chem. 156, 177—211. 1875.

Arbeit angegeben wurde. In einer späteren Untersuchung: „Über das Gewicht und die Ursache der Wasserhaut bei Glas und anderen Körpern"[1]) wies dann WARBURG gemeinsam mit seinem Schüler IHMORI nach, daß durch das Alkali des Glases eine permanente Wasserhaut gebunden ist, die im Vakuum nicht verschwindet, während die Metalle und alkalifreies Glas keine permanente Wasserhaut bilden. Hiervon hat die Vakuumröhrentechnik Nutzen gezogen.

Bei der Untersuchung von elektrischen Glimmentladungen in verdünnten Gasen[2]) entdeckte WARBURG das wichtige Gesetz, daß der Spannungsabfall zwischen Kathode und negativem Glimmlicht vom Druck des Gases unabhängig ist, solange die Kathode nicht ganz mit Glimmlicht überzogen ist; für diesen Spannungsabfall prägte er den Namen „Kathodengefälle". Diese und andere Ergebnisse seiner Untersuchungen an Glimmentladungen bilden die Grundlagen für die technische Ausnutzung des Glimmlichtes in den MOORE- und Glimmlampen, den Glimmgleichrichtern und Blitzschutzglimmröhren für Telephonanlagen.

In mehreren Arbeiten untersuchte WARBURG die elektrische Polarisation und lieferte Beiträge zur Erklärung dieser Erscheinung, die in der Technik bei Primär- und Sekundärelementen, elektrolytischen Prozessen und den Elektrolyt-Elektrizitätszählern eine Rolle spielt. 1896 entdeckte er die Beeinflussung der Verzögerung der Funkenentladung durch ultraviolettes Licht[3]). Diese durch die Ionentheorie später erklärte Verzögerung findet neuerdings in der Hochspannungstechnik Beachtung bei der Erklärung der Wirkung der elektrischen Wanderwellen und der Messung ihrer Spannung. In einer großen Zahl fortlaufender Veröffentlichungen behandelte er die Ozonbildung bei elektrischen Entladungen unter besonderer Berücksichtigung des SIEMENSschen Ozonapparates. Gemeinsam mit HEUSE untersuchte er die elastische Nachwirkung und elastische Hysteresis[4]) und gab eine Konstruktion von Aneroiden mit sehr geringer Nachwirkung an.

1917 entwickelte WARBURG den Plan[5]), eine von Materialeigenschaften unabhängige rationelle Lichteinheit zu gewinnen, sie sollte dargestellt werden durch die Lichtstärke der Öffnung (von gegebener Größe) eines Hohlraumstrahlers bei einer bestimmten Temperatur, deren Wert durch Intensitätsvergleiche mit der lichtelektrischen Kaliumzelle bei dieser und zwei weiteren Temperaturen aus der WIENschen Formel abgeleitet wird. Die Konstante des WIEN-PLANCKschen Strahlungsgesetzes[1]) hatte er zuvor gemeinsam mit MÜLLER neu bestimmt.

Ein Techniker, der das Gesamtgebiet der Technik so übersähe, wie WARBURG das Gesamtgebiet der Physik beherrscht, würde zweifellos bei genauer Durchsicht des umfangreichen Schaffens WARBURGS noch mehreres aufzeigen können, auf das die Technik aufgebaut hat. Aber auch die unvollständige Auswahl beleuchtet die Bedeutung der wissenschaftlichen Forschungsarbeit WARBURGS für die Technik zur Genüge.

Seine objektive und kritische Denkweise wußte WARBURG auch seinen Schülern einzupflanzen; wie geeignet diese Schulung für die Aufgaben der Technik war, erhellt aus der Tatsache, daß eine Reihe seiner Schüler sich der Technik zugewandt haben und wir unter diesen recht bekannte Namen finden.

Aber nicht nur mittelbar wirkte WARBURG für die Technik. Als er im Jahre 1905 von dem physikalischen Lehrstuhl an der Universität Berlin zum Präsidenten der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt berufen war, die nach den Ideen von HELMHOLTZ und SIEMENS der Zusammenarbeit zwischen Physik und Technik diente, suchte er die Verbindung mit den technisch-wissenschaftlichen Vereinen und Verbänden. Er wirkte im Vorstande des Elektrotechnischen Vereins Berlin und führte 1907 und 1908 dessen Vorsitz. Den Erfolg dieser Tätigkeit beleuchten am besten die Worte, mit denen im Jahre 1909 der damalige Vorsitzende WILHEM V. SIEMENS in der Vereinsversammlung den Vorschlag des Vorstandes begründete, die 1904 gestiftete, alle 5 Jahre zur Verleihung kommende SIEMENS-STEPHAN-Gedenkplakette E. WARBURG zu verleihen: (Nach einem Hinweis auf die wissenschaftlichen Erfolge WARBURGS und sein Wirken als Präsident der Reichsanstalt) „drittens ist Herr WARBURG ein ausgezeichneter Vorsitzender unseres Vereins gewesen und Sie wissen, das eines seiner besonderen Verdienste darin besteht, daß er wesentlich dazu beigetragen hat, Ordnung in unser ganzes deutsches elektrisches Verbands- und Vereinswesen zu bringen und wir dürfen das wohl mit in erster Linie seinem vorurteilslosen von Vereinschauvinismus ganz freiem Blick zuschreiben und seinem immer in erster Linie auf das wesentliche gerichteten Blick, so daß wir nun glücklich wieder eine angenehme Harmonie auf diesem Gebiete erreicht haben, daß wir zu verständigen Verhältnissen gekommen sind, die auch sicher dauernde zu sein versprechen".

Dem Verein Deutscher Ingenieure erfüllte er einen seit längerem gehegten Wunsch und stellte einen Ingenieur zur Ausführung wärmetechnischer Untersuchungen an der Reichsanstalt ein; er knüpfte auch zu diesem Verein nähere Beziehungen an, seit 1913 sind zwei Mitglieder der Anstalt in den wissenschaftlichen Beirat des Vereins delegiert.

[1]) Ann. d. Phys. u. Chem. **27**, 481—507. 1886.
[2]) Wied. Ann. **31**, 545—549. 1887; Wied. Ann. **40**, 1—18. 1890.
[3]) Wied. Ann. **59**, 1—16. 1896; **62**, 385—395. 1897; Verhandl. d. dtsch. phys. Ges. **17**, 92. 1898.
[4]) Verhandl. d. dtsch. phys. Ges. **17**, 206—213. 1915. Zeitschr. f. Instrumentenkunde **39**, 41—54. 1919.
[5]) Verhandl. d. dtsch. phys. Ges. **19**, 3—10. 1917.
[1]) Ann. d. Phys. **48**, 410—432. 1915.

1912 rief er die Beleuchtungstechnische Gesellschaft ins Leben und war deren Vorsitzender bis 1919. Die Gesellschaft ehrte ihn durch Wahl zum Ehrenvorsitzenden, noch jetzt ist er rühriges Mitglied einer Kommission. Auch an der Gründung der Deutschen Gesellschaft für Technische Physik war WARBURG beteiligt und ist deren Ehrenvorsitzender. Es ist bewunderswert, wie er neben seiner regen wissenschaftlichen Produktion, neben der großen Bürde, die die Leitung einer umfangreichen Anstalt mit sich brachte, neben den Vereinssitzungen und Kolloquien der reinen Physik trotz seines hohen Alters Zeit und Kraft zum regen Besuch der Sitzungen der technischen Vereine aufbrachte. Dieses nicht gering anzuschlagende Opfer brachte er, um Wissenschaft und Technik einander näher zu bringen. Wie er bei seiner Ehrenpromotion durch die Technische Hochschule Charlottenburg anläßlich seines goldenen Doktorjubiläums 1917 launig bemerkte, war er der Ansicht „daß die Ingenieure und Physiker noch zu wenig von einander wissen, wenigstens erkläre ich mir dadurch Urteile, die man zuweilen hört. So rümpft der Physiker gelegentlich die Nase über die Sicherheitskoeffizienten und die nicht strenge Methode des Ingenieurs und der Ingenieur spottet zuweilen über die Unfruchtbarkeit der reinen Wissenschaft". Die Technik, vertreten durch 14 der namhaftesten wissenschaftlich technischen Vereine, stattet ihm anläßlich dieses Jubiläums ihren Dank durch Überreichung seiner Büste mit folgender Widmung ab: „Dem unermüdlichen und erfolgreichen Förderer wissenschaftlicher Forschung auf dem Gebiete der physikalischen Technik, der die wissenschaftlichen Bedürfnisse der Technik selbst erkundend und an der Gemeinschaftsarbeit technischer Verbände regen Anteil nehmend zum lebendigen Bindeglied zwischen der Wahrheit suchenden Wissenschaft und der Nutzen bringenden Technik wurde".

Als Präsident der Reichsanstalt widmete WARBURG lebhaftes und tätiges Interesse der Darstellung und Festlegung der empirischen Grundeinheiten. Auf dem internationalen Elektrikerkongreß in Chicago waren 1893 *drei* empirische elektrische Grundeinheiten festgesetzt worden, das intern. Ohm durch den Widerstand einer bestimmten Quecksilbersäule, das intern. Amp. durch das Silbervoltameter und das intern. Volt durch das Clarkelement. Deutschland hatte 1898 durch Reichsgesetz nur das intern. Ohm und Ampere angenommen, da das Volt sich hieraus nach dem OHMschen Gesetz ergab; die überwiegende Mehrzahl der anderen Staaten hatten aber alle drei Einheiten in ihre Landesgesetze übernommen; es stellte sich jedoch heraus, daß die drei in Chicago festgesetzten Einheiten das OHMsche Gesetz nicht genau erfüllten, der Fehler war nahezu 1 promille. Auf der 1905 von der Reichsanstalt nach Charlottenburg einberufenen vorbereitenden internationalen Konferenz setzte es WARBURG durch, daß auch die anderen Staaten sich zur Festlegung von nur zwei elektrischen Grundeinheiten bereit erklärten, und zwar — es gab hierbei erhebliche Widerstände zu überwinden — das intern. Ohm und Ampere. Auf der internationalen Konferenz zu London 1908 wurde diese Festsetzung zum Beschluß erhoben. Dabei stellte WARBURG die Forderung, welche die Konferenz auch annahm, daß diese beiden intern. Grundeinheiten nicht verändert werden sollten, wenn spätere genauere Messungen Abweichungen gegen die absoluten Einheiten ergäben, die Technik müsse zur Ruhe kommen. Wie wesentlich diese weitblickende Forderung war, geht daraus hervor, daß 1914 die deutsche und die englische Reichsanstalt, nach verschiedenen Methoden messend, übereinstimmend fanden, daß das internationale Ohm um 0,51 promille vom absoluten Ohm abweicht.

Bei der Londoner Konferenz wurde das sog. RAYLEIGH-Komitee aus 15 Delegierten eingesetzt, welches bis zur Bildung einer permanenten Kommission (zu der es nicht kam) die internationalen Ziele weiter verfolgen sollte. WARBURG war der Vorsitzende dieses Komitees, das u. a. eine internationale Vereinbarung über die Spannung des Weston-Normalelementes in intern. Volt zustande brachte.

Auch für die internationale Festsetzung der Kupfernormalien, welche für die Elektrotechnik von größter Bedeutung war, setzte WARBURG sich persönlich ein. Für 1914 hatte er eine internationale Konferenz für Temperatur- und Wärmeeinheiten nach Berlin einberufen, leider verhinderte der Krieg das Zustandekommen; persönlich förderte er die Vorarbeiten für ein Gesetz über die Temperaturskala und die Wärmeeinheit, das, allerdings erst nach seinem Ausscheiden aus dem Amte, durch den Reichstag am 7. August 1924 angenommen wurde.

Als 1912 der Handel mit Radium und Mesothor für medizinische Zwecke aufkam, veranlaßte er in der Reichsanstalt die Einrichtung der Prüfung solcher Präparate durch Vergleich ihrer γ-Strahlung mit der eines an die internationale Normale in Paris angeschlossenen Standard. Nach dem Kriege veranlaßte er die Ausarbeitung einer einwandfreien absoluten Dosismessung für Röntgenstrahlen durch die Reichsanstalt, womit einem dringenden Bedürfnis der Ärzte genügt wurde. Die von der Reichsanstalt vorgeschlagene absolute Dosiseinheit wurde 1923 von der Deutschen Röntgengesellschaft angenommen, auch im Auslande beginnt sie sich einzuführen.

In der Reichsanstalt legte WARBURG das größte Gewicht auf die wissenschaftliche Betätigung, auch der technisch gerichteten ließ er seine Förderung gedeihen; erwähnt wurde bereits die Einstellung eines Ingenieurs für wärmetechnische Untersuchungen und die Ausstattung eines entsprechenden Laboratoriums, das 1914 durch einen Ausbau vergrößert wurde. Das Starkstromlaboratorium setzte er durch Vermehrung des Personals und der experimentellen Mittel in die Lage,

mit der rapiden Entwicklung der Elektrotechnik Schritt zu halten, bald wurden die verfügbaren Räume zu voll und für die ständig wachsenden Hochspannungen zu eng. WARBURGS Bemühungen, ein neues den technischen Anforderungen entsprechendes Gebäude bewilligt zu erhalten, wurden nach ziemlich weit gediehenen Vorarbeiten und Planungen durch die Reichsfinanzreform 1908 zunächst vereitelt, er nahm sie später wieder auf und erreichte 1912, unter Betonung der Gefährlichkeit der Hochspannung in den unzureichenden Räumen, die Bewilligung eines Neubaues mit Einrichtung für $^3/_4$ Million Mark, Anfang 1914 konnte die Übersiedelung in das neue Haus vollzogen werden. Ein ebenfalls von ihm beantragter wichtiger Neubau für ein Laboratorium für Grundeinheiten für 100 000 Mark wurde bedauerlicherweise abgeschlagen; „leider sind diese Arbeiten gänzlich ungefährlich", sagte er scherzend. 1914 ließ WARBURG Arbeiten zur Gasverflüssigung aufnehmen, die aber wie vieles andere durch den Krieg unterbrochen wurden, vor kurzem haben sie zur Verflüssigung von Helium geführt.

Der Reichsanstalt, welche die Zusammenarbeit der Physik und der Technik pflegen soll, wußte WARBURG eine für diesen Zweck geeignetere Organisation zu geben. Bei der Gründung der Anstalt hatte SIEMENS die Pflege der reinen Forschung, HELMHOLTZ die Förderung der Technik betont, es wurde demgemäß die Anstalt in zwei Abteilungen, eine rein wissenschaftliche und eine technisch-wissenschaftliche gegliedert, in der Hoffnung, daß beide Abteilungen in der lebendigen Wechselwirkung am besten gedeihen würden. Statt dieser Wechselwirkung drohte eine Kluft zwischen den beiden Abteilungen einzutreten. WARBURG gliederte die Anstalt in drei große Abteilungen für Optik, Elektrizität und Wärme, deren jede rein wissenschaftliche und technisch-wissenschaftliche Laboratorien unter demselben Direktor vereinigt; auch werden von technischen Laboratorien rein wissenschaftliche Aufgaben bearbeitet. Diese Regelung hat sich gut bewährt und Reibungen beseitigt, ihre Auswirkung auf die Arbeit bleibt nicht aus.

So sind die Wirkungen WARBURGS zur Technik mannigfaltig und bedeutend gewesen. Mögen Wissenschaft und Technik den Dank, den sie WARBURG schulden, durch vorurteilsfreie Sachlichkeit nach seinem Vorbilde und durch Bemühen zu gegenseitigem Verständnis abtragen.

Der Wirkungsquerschnitt bei atomaren Stoßprozessen.

Von J. FRANCK, Göttingen.

Untersuchungen aus dem Gebiete der kinetischen Gastheorie, von denen insbesondere die klassischen Arbeiten von WARBURG und KUNDT über innere Reibung von Gasen zu nennen sind, haben uns den Durchmesser von Atomen und Molekülen zu messen gelehrt. Man erhält Werte, die von Molekül zu Molekül verschieden sind, aber durchweg die Größenordnung von 10^{-8} cm besitzen. Unter Moleküldurchmesser versteht man dabei den Durchmesser einer um den Mittelpunkt eines Moleküls beschriebenen Kugel, in die bei Zusammenstößen andere Atome und Moleküle nicht eindringen können. In erster Näherung wirken bei den gaskinetischen elastischen Zusammenstößen die Atome und Moleküle wie starre Kugeln von gegebenem Durchmesser. Man war sich schon frühzeitig bewußt, daß die Atome nicht in Wirklichkeit starre Kugeln sind, sondern daß sie aufeinander Kräfte ausüben, die mit einer hohen Potenz der Entfernung abnehmen. Es muß daher auch der Stoßradius eines Atoms nicht konstant sein, vielmehr muß der Abstand, bis zu dem zwei Atome sich nähern können, von der Relativgeschwindigkeit abhängig sein, mit der sie aufeinandertreffen. In der Tat hat man auch die Abhängigkeit der inneren Reibung von Gasen von der Temperatur nur wiedergeben können, indem man nach dem Vorgang von SUTHERLAND eine Abhängigkeit des Stoßquerschnittes von der Relativgeschwindigkeit der Stoßpartner einführte.

Ich darf als bekannt voraussetzen, wie, aufbauend auf experimentellen Untersuchungen über Kathoden- und α-Strahlen (insbesondere von LENARD und von RUTHERFORD), BOHR dazu geführt wurde, anzunehmen, daß das Atom aus positiv geladenen Kernen und Elektronen aufgebaut sei, die den positiven Kern auf Planetenbahnen umkreisen, und wie es ihm gelang auf Grund dieser Vorstellung die spektralen Emissionen der Atome und Moleküle zu deuten. Der Bahndurchmesser des normalen Atoms im unangeregten Zustand stimmt dabei mit dem Bahndurchmesser des am lockersten gebundenen Elektrons der Größenordnung nach überein. Bringen wir Atome oder Moleküle in einen höheren Quantenzustand, indem wir durch Energiezufuhr Strahlungsprozesse anregen, so wächst nach der BOHRschen Theorie mit der Höhe der Anregung der Bahndurchmesser des Leuchtelektrons. Hiermit steht, worauf zuerst STERN und VOLMER[1]) hingewiesen haben, in bestem Einklang, daß bei allen quantitativen Versuchen über die Stoßdämpfung von Spektrallinien[2]) die Zahl der Zusammenstöße und damit der Stoßquerschnitt des angeregten Atoms oder Moleküls größer angesetzt werden muß, als sich aus der kinetischen Gastheorie ergibt. Nach den neuen Vorstellungen der Quantenmechanik wird man dabei nicht erwarten dürfen, daß der Stoßquerschnitt wirklich mit dem auf Grund der gewöhnlichen Mechanik sich ergebenden Bahndurchmesser des Leuchtelektrons übereinstimmt, aber qualitativ wird eine Ähnlichkeit bestehen bleiben. Besonders

[1]) STERN und VOLMER, Phys. Zeitschr. **20**, 183. 1919.
[2]) FÜCHTBAUER, Phys. Zeitschr. **14**, 1164, 1168. 1913.

geeignet zur Festlegung der Stoßradien angeregter Atome hat sich die Auslöschung der Fluorescenz von einatomigen Gasen durch Zusatz von Fremdgasen erwiesen[1]). Wählt man als Zusatzgas solche Gase, bei denen durch den Stoßvorgang die gesamte Anregungsenergie in Energie der Wärmebewegung (Translation, Schwingung, Rotation) umgewandelt wird, so kann man aus der Lichtschwächung, die ein Gaszusatz bestimmten Druckes ergibt, ausrechnen, auf welchen Abstand das fremde Atom oder Molekül dem angeregten nahekommen muß, um einen strahlungslosen Übergang des angeregten Atoms in seinen Normalzustand durch einen sog. Stoß zweiter Art zu erzwingen. Bei stark auslöschenden Gasen ergeben sich Werte, die das 6—8fache des gaskinetischen Durchmessers eines Atoms betragen können, selbst wenn das Atom sich nur in der ersten Anregungsstufe befindet. Es zeigt sich, daß bei den Zusammenstößen innere Energie und kinetische Relativenergie der Stoßpartner zusammenwirken können, um beim Zusammenstoß eine oder beide Stoßpartner in einen anderen Quantenzustand zu überführen. Nur solche Quantensprünge finden statt, für die in Summa die nötige Energie vorhanden ist. Die Häufigkeit der Übergänge und der Wirkungsquerschnitt hängen von vielen Parametern ab, die zum kleinen Teil aus experimenteller und theoretischer Behandlung des Problems zu entnehmen sind[2]).

Allgemein hat sich ergeben, daß die Übergänge mit um so größerer Häufigkeit stattfinden und daß der Wirkungsquerschnitt um so größer ist, je weniger Energie aus der Translationsbewegung entnommen und bzw. in sie umgesetzt werden muß. Als ein Beispiel mag erwähnt werden, daß Zusammenstöße von angeregten Atomen mit Edelgasen, die ihrerseits schwer anregbar sind, die Fluorescenzemission sehr wenig stören, während umgekehrt Zusammenstöße mit einatomigen Gasen, die zu ihrer Anregung weniger Energie bedürfen, als in dem ursprünglich angeregten Atome vorhanden ist, die ursprüngliche Fluorescenz stark schwächen. Die Energie wird größtenteils verwendet, um die stoßenden Atome anzuregen, und man beobachtet die Erscheinung der sensibilisierten Fluorescenz. Dabei werden diejenigen Spektrallinien am stärksten emittiert, die fast die gleiche Anregungsenergie besitzen wie das ursprünglich angeregte Atom. Man kann die Verhältnisse im mechanischen Bilde am besten wiedergeben, wenn man sagt, daß die Zahl der Quantenübergänge um so mehr steigt, je weiter wir uns der Resonanz zwischen der Schwingung des ursprünglich angeregten Atoms und der im stoßenden Atom anzuregenden nähern. Auch die Auslöschung der Fluorescenz durch Zusatz von mehratomigen Gasen läßt sich anscheinend so deuten. Wiederum scheinen die Gase die Fluorescenz am stärksten zu stören, die die gesamte Energie in molekulare Schwingungsenergie überführen können. Dabei kann die Schwingungsenergie so stark werden, daß das mit dem angeregten Atom zusammenstoßende Molekül dissoziiert wird. Auch die Relativgeschwindigkeit der Stoßpartner muß, wie aus thermodynamischen Überlegungen folgt[1]), auf die Ausbeute an Stößen zweiter Art einen wesentlichen Einfluß haben. Ob jedoch die Tatsache, daß die Auslöschung der Quecksilberresonanzfluorescenz durch Stickstoff bei Zimmertemperatur recht stark ist, dagegen bei ca. 1000° (abs.) unmerklich wird, hierdurch zu deuten ist, steht noch nicht fest[2]).

Insgesamt wird man danach erwarten dürfen, daß bei scharfer Resonanz zwischen dem angeregten Atom und dem stoßenden Atom sehr große Wirkungsquerschnitte zu erwarten sind. Diesen Fall kann man verwirklichen, wenn ein angeregtes Atom mit einem nicht angeregten Atom der gleichen Atomsorte zusammenstößt. In diesem Falle sollte das primär angeregte Atom oft strahlungslos in seinen Normalzustand zurückgehen können, während das stoßende Atom seinerseits angeregt wird. Dieser Vorgang sollte ferner um so häufiger auftreten, je größer die natürliche Übergangswahrscheinlichkeit des betreffenden Quantensprunges ist. Da ein Auftreten neuer Spektrallinien hier wegfällt, so muß man nach anderen Indikatoren für einen großen Wirkungsquerschnitt suchen. Einen Weg dazu hat Frl. MENSING[3]) theoretisch angegeben und haben MINKOWSKI[4]), HOLTZMARK[5]) u. a. experimentell studiert. Er besteht in der Untersuchung der Verbreiterung der Absorptions- und Emissionslinien bei Steigerung des Druckes eines reinen Gases. Es hat sich dabei in der Tat gezeigt, daß die Zusammenstöße zwischen Atomen der gleichen Sorte eine viel größere Stoßdämpfung verursachen als Zusammenstöße mit fremden Atomen und Molekülen.

Eine weitere Möglichkeit zum Nachweis dieses Effektes besteht in der Untersuchung des Polarisationsgrades des Fluorescenzlichtes bei Anregung mit linear polarisiertem Licht. Nach der Entdeckung von WOOD und ELLET[6]) ist bei sehr niederen Quecksilberdrucken die Resonanzfluorescenz des Quecksilbers fast völlig linear polarisiert bei Anregung mit linear polarisiertem Licht. Störungen durch selbst sehr schwache äußere Magnetfelder und ebenfalls Zusammenstöße ergeben eine Depolarisation. Über

[1]) STUART, Zeitschr. f. Phys. **32**, 262. 1925; MANNKOPF, Zeitschr. f. Phys. Im Erscheinen begriffen.

[2]) Siehe z. B. eine Zusammenfassung bei J. FRANCK, Ergebnisse d. exakt. Nat. **II**, 106. 1923 und insbesondere NORDHEIM, Zeitschr. f. Phys. in einer im Drucke befindlichen Arbeit.

[1]) KLEIN und ROSSELAND, Zeitschr. f. Phys. **4**, 46. 1921.

[2]) Die betr. Beobachtungen von CARIO und FRANCK sind noch nicht publiziert, in einer Arbeit, die in der Zeitschr. f. Phys. erscheinen soll, wird die Frage näher diskutiert werden.

[3]) L. MENSING, Zeitschr. f. Phys. **34**, 611. 1925.

[4]) MINKOWSKI, Die Naturwissenschaften **13**, 1091. 1925.

[5]) HOLTZMARK, Zeitschr. f. Phys. **34**, 722. 1925.

[6]) R. W. WOOD und ELLET, Proc. Roy. Soc. London **103**, 396. 1923.

dieses Gebiet ist eine größere Reihe von Untersuchungen angestellt, eine Zusammenstellung der Ergebnisse findet sich in einem Bericht von HANLE[1]), auf den hier verwiesen werden mag. Hier genügen einige kürzere Angaben. Der Einfluß der schwächeren Magnetfelder hat sich als Spezialfall eines Zeemaneffektes erwiesen, bei dem die sich rechnerisch ergebende Aufspaltung kleiner als die Breite der Spektrallinie ist. Die fast völlige Polarisation des Resonanzfluorescenzlichtes des Quecksilbers bei Störungsfreiheit läßt sich nach BOHR[2]) durch die Überlegung deuten, daß ohne ein äußeres Feld zwar keine Richtung der Atomachse im Raum ausgezeichnet ist, daß aber unter dem Einfluß des polarisierten Lichtes der Übergang in den höheren Quantenzustand unter einer gleichzeitigen Orientierung der ausgezeichneten Achse zur Richtung des elektrischen Vektors stattfindet. Nach HEISENBERG[3]) kann man den Polarisationsgrad für diesen Fall demjenigen gleichstellen, der sich ergibt, wenn ein Magnetfeld vorhanden ist, dessen Kraftlinien $\parallel$ dem elektrischen Vektor des Lichtes verlaufen. Man erhält dann für die Resonanzlinie des Quecksilbers 100% Polarisation, was mit dem experimentellen Befund (90—95%) gut übereinstimmt. Die Depolarisation der Resonanzstrahlung wird schon von einem Druck $= {}^1/_{1000}$ mm an merklich. Die Abhängigkeit vom Druck ohne Einwirkung eines äußeren Feldes ist jedoch noch nicht näher untersucht. Man kann daher aus der Tatsache, daß schon bei so niederen Drucken Depolarisation auftritt, nur schließen, daß der Wirkungsquerschnitt für depolarisierende Stöße wesentlich größer als der gaskinetische sein muß. Da die Frequenz bei der Depolarisation die gleiche bleibt, so kommt der Umsatz von Anregungsenergie in Translationsenergie hierbei nicht in Frage.

Neuerdings hat nun SCHÜTZ[4]), von recht ähnlichen Überlegungen ausgehend, die Depolarisation der Quecksilberresonanzstrahlung in einem äußeren Magnetfelde untersucht, dessen Kraftlinien $\parallel$ zum elektrischen Vektor standen. Er erhält bei 2000, 9000 und 18000 Gauß bei Drucken von $2 \cdot 10^{-4}$ mm und $1 \cdot 10^{-3}$ mm nur einen kleinen, aber sicher nachweisbaren Prozentsatz $\perp$ zum Feld polarisierten Lichtes, der nach seinen Messungen von der Feldstärke unabhängig ist. Der Übergang vom π-Zustand zum σ-Zustand erfolgt, wenn unangeregte Quecksilberatome dem angeregten auf einen Abstand nahekommen, der etwa das 10fache des gaskinetischen Radius normaler Atome beträgt. Da die Aufspaltungen klein sind, so ist nach den obigen Ausführungen der große Wirkungsquerschnitt verständlich und wird auch von SCHÜTZ ähnlich gedeutet. Im Widerspruch aber zu den obigen Annahmen scheint die Unabhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von der Feldstärke zu stehen. Man sollte vielmehr erwarten, daß er mit der Feldstärke rasch abnimmt, da wir uns von der Resonanz immer weiter entfernen und wegen der magnetischen Aufspaltungen der Terme ein proportional mit der Feldstärke anwachsender Energiebetrag in Translationsenergie umgesetzt werden muß, wenn ein Übergang aus dem π- in den σ-Zustand erfolgt. Man kann vielleicht annehmen, daß die Unabhängigkeit von der Feldstärke bei SCHÜTZ nur vorgetäuscht ist, da die Quecksilberresonanzlinie aus 5 Komponenten[1]) besteht und die Aufspaltung selbst bei dem stärksten von SCHÜTZ verwandten Feld von der Größenordnung der Komponentenaufspaltung bleibt.

Eine quantitative Untersuchung der Polarisation in Abhängigkeit vom Druck bei Ausschaltung äußerer Felder müßte, wenn diese Überlegung stimmt, noch wesentlich größere Wirkungsquerschnitte ergeben, besonders wenn man statt der Quecksilberresonanz die D-Linienresonanz des Natriums untersucht. Die natürliche Übergangswahrscheinlichkeit der D-Linien des Natriums ist um ein Vielfaches größer als die der Resonanzlinie des Quecksilbers, und ferner haben bei Natrium im Gegensatz zum Quecksilber auch die normalen Atome ein magnetisches Moment, durch das sie die Einstellung der ausgezeichneten Achse der angeregten Atome verändern können. Einen Anhaltspunkt dafür, daß der Wirkungsquerschnitt hier wesentlich größer sein muß als beim angeregten Quecksilber, kann man aus der Tatsache entnehmen, daß es bisher nicht gelungen ist, bei der Natriumfluorescenz den nach der Theorie von HEISENBERG zu erwartenden Polarisationsgrad zu erhalten. Allerdings wird die Deutung der bisher vorliegenden Angaben erschwert, da bisher nur die Polarisation der Fluorescenz beider D-Linien gemeinschaftlich im Felde 0 untersucht worden ist. Die D_1-Linie muß nach der Theorie unpolarisiert sein (siehe die hiermit im Einklang befindlichen Resultate von P. PRINGSHEIM[2]) und E. GAVIOLA bei Untersuchung im Magnetfelde), während die D_2 bei Anregung mit linear polarisiertem Licht zu 60% polarisiert sein soll, wenn keine Störungen vorliegen.

Eine Prüfung der Theorie und eine gleichzeitige Messung des Abstandes, über den hin die Atome noch merklich depolarisierend wirken, läßt sich also vornehmen, wenn man die Resonanzfluorescenz des Na mit linear polarisiertem Licht der D_2-Linie anregt. Eine solche Untersuchung hat Herr DATTA in meinem Institut im letzten Jahre ausgeführt[3]). Es zeigt sich im Druckbereich von 10^{-4} bis 10^{-7} mm eine ganz gesetzmäßige Zunahme der Stärke der Polarisation. Bei ca. 10^{-5} mm ist der Polarisationsgrad auf den Wert von ca. 20% gesunken. Diesen Wert hat man als Resultat der erzwungenen Schwingungen bei Anregung mit linear polari-

[1]) HANLE, Ergebnisse d. exakt. Naturw. IV, 214. 1925.
[2]) N. BOHR, Naturwissenschaften 12, 1115. 1924.
[3]) W. HEISENBERG, Zeitschr. f. Phys. 31, 617. 1925.
[4]) W. SCHÜTZ, Zeitschr. f. Phys. 35, 260. 1925.

[1]) Siehe R. W. WOOD, Phil. mag. 50, 761. 1925.
[2]) E. GAVIOLA und P. PRINGSHEIM, Zeitschr. f. Phys. 25, 367. 1924.
[3]) Die Arbeit erscheint demnächst ausführlich als Dissertation des Herrn DATTA.

siertem Licht zu erwarten, wenn alle Richtungen der Achse der Atome im Raum gleich oft vorkommen. Bei diesem Drucke wird also schon eine Vorzugsrichtung unter der Einwirkung der Atome aufeinander völlig aufgehoben. Auch bei 10^{-7} cm. ist die Polarisation noch nicht bis auf 60% angestiegen, aber eine allerdings unsichere Extrapolation der Kurve läßt diesen Wert als möglich erscheinen. Berechnet man aus der Kurve den mittleren Abstand, über den hin die Atome depolarisierend wirken, so erhält man das 10 ooofache des gaskinetischen Querschnittes, nämlich 10^{-4} cm. Schaltet man ein äußeres Magnetfeld ein, deren Kraftlinien ∥ zum elektrischen Vektor des erregenden Lichtes liegen, so wird, wie erwartet, die Einwirkung des Druckes geringer, und es läßt sich bei kleinem Druck der theoretische Wert von 60% erreichen. Das ist verständlich, da beim Vorhandensein des Magnetfeldes ein kleiner Energieaustausch zwischen Translations- und Anregungsenergie stattfinden muß, um Depolarisation zu ergeben. Herr DATTA ist damit beschäftigt, die Einwirkung äußerer Magnetfelder mit der der Atome aufeinander quantitativ zu vergleichen. Es ist zu hoffen, daß man auf diese Weise eine genauere Kenntnis über das die Atome umgebende Kraftfeld erhalten kann, bisher läßt sich nur sagen, daß sein Vorhandensein sich bis auf einen Abstand von 10^{-4} cm vom Atomkern mit Sicherheit nachweisen läßt.

Göttingen, II. Phys. Inst., Februar 1926.

Zur quantenhaften Lichtabsorption in festen Körpern.

Von ROBERT POHL, Göttingen.

Bei der Abspaltung von Elektronen durch Licht (lichtelektrische Wirkung) hat man sowohl die Energie wie die Zahl der Elektronen in ihrer Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge untersucht. — Zu beiden Fragen macht die Annahme einer quantenhaften Lichtabsorption eine bestimmte Voraussage:

1. die kinetische Energie der Elektronen soll linear mit der *Frequenz*,

2. die Zahl der Elektronen proportional der *Wellenlänge* des Lichtes ansteigen; vgl. Fig. 1a.

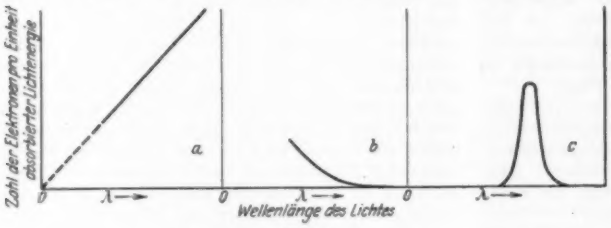


Fig. 1.

Das Experiment hat die erste, 1905 von EINSTEIN (1) gemachte Voraussage glänzend bestätigt. (ERICH LADENBURG, JOFFE, MILLIKAN, WAGNER u. a.) (2). Die Gleichung $\frac{1}{2} m u^2 = h\nu - p$ läßt ein außerordentlich umfangreiches, mit großem Arbeitsaufwand gewonnenes Beobachtungsmaterial in einfachster Form zusammenfassen.

Ganz anders steht es bisher mit der zweiten Frage, der Abhängigkeit der Elektronenzahl von der Lichtwellenlänge. An systematischer Beobachtung hat es hier nicht gefehlt. Aber der Erfolg war recht bescheiden. Es gelang, für die Zahl der Elektronen pro Einheit absorbierter Lichtenergie zwei charakteristische Typen der spektralen Abhängigkeit zu trennen: Bei der ersten, Fig. 1b, steigt die Zahl der Elektronen kontinuierlich mit der Frequenz des Lichtes: „normaler Photoeffekt". Bei der zweiten, Fig. 1c, zeigt sie in einem engen Wellenbereich ein scharfes, an eine Resonanzkurve erinnerndes Maximum: „selektiver Photoeffekt" (3).

Den selektiven Photoeffekt beobachtet man nie ohne einen untergelagerten normalen. Doch lassen sich beide Effekte trennen, wenn man polarisiertes Licht und optisch einwandfrei spiegelnde Metalloberflächen verwendet (4). Man kann dann den selektiven Photoeffekt unterdrücken, indem man dem elektrischen Lichtvektor keine zur Metalloberfläche senkrechte Komponente gibt.

Weder der normale noch der selektive Photoeffekt lieferte nun eine Bestätigung der oben unter (2) gemachten Voraussage. Von einer Proportionalität der Elektronenzahl mit der Lichtwellenlänge war nicht die Rede. Überdies blieben die Elektronenzahlen weit hinter dem „Quantenäquivalent" zurück: Beim normalen Photoeffekt kam erst auf Tausende, beim selektiven in günstigsten Fällen auf 40 Lichtquanten ein Elektron (5).

Trotzdem konnte von einer Widerlegung der „Äquivalentvoraussage" nie die Rede sein. Die Schwäche der Beobachtungen über den normalen und den selektiven Photoeffekt lag zu klar zu Tage. Sie wurde auch von P. PRINGSHEIM und mir in vielen Veröffentlichungen betont (6): Man maß ja bei den lichtelektrischen Beobachtungen an festen Körpern (meist Metallen) nicht die Zahl der vom Licht primär *abgespaltenen* Elektronen. Zur Beobachtung gelangte vielmehr nur der Bruchteil, der schließlich durch die Oberfläche der Körper *entweichen* konnte.

Überdies zeigte jede Erweiterung unserer Versuche, welch entscheidenden Einfluß ungeklärte Vorgänge an der Metalloberfläche hatten. Es

gelang uns, die spektrale Verteilung des normalen Photoeffektes (Fig. 1b) willkürlich um mehr als eine Oktave hin und her zu schieben (7). Wir konnten am Kalium das Maximum des selektiven Photoeffektes um mehr als 30 $m\mu$ willkürlich verlagern (8). Das Verhältnis von selektiven zum normalen Photoeffekt variierte von Oberfläche zu Oberfläche in rätselhafter Verschiedenheit(9). Selbst an der gleichen Fläche gab es starke zeitliche Änderungen. Schließlich beschrieb WIEDMANN(10) sogar ein Verfahren, K-Flächen ganz ohne selektiven Photoeffekt herzustellen. Dieser trat erst auf, wenn feuchter Wasserstoff mit dem Kalium chemisch reagierte und eine sichtbare Trübung der Oberfläche hervorrief.

Auf der anderen Seite veröffentlichte jetzt E. WARBURG (11) ein Ergebnis von allgemein als groß anerkannter Tragweite. WARBURG hatte nicht die Zahl der vom Licht abgespaltenen Elektronen gemessen, sondern die Zahl der photochemischen Elementarprozesse in Gasen. WARBURG fand wenigstens in einzelnen Fällen eine Gültigkeit von EINSTEINS „photochemischem Äquivalentgesetz". Er fand pro absorbiertes Lichtquant $h\nu$ einen photochemischen Elementarprozeß.

Dieser WARBURGsche Befund konnte bei sinngemäßer Übertragung eigentlich keinen Zweifel lassen, daß die im normalen und selektiven Photoeffekt beobachteten Elektronenzahlen keineswegs geeignet waren, um die oben unter (2) aufgeführte Voraussage zu prüfen. Ebenso klar war es aber, daß der bisher begangene Weg als Sackgasse aufzugeben war. *Die Beobachtungen des lichtelektrischen Effektes an der Metalloberfläche führten nicht mehr weiter.* Am allerwenigsten mit den Hilfsmitteln, die uns in der ersten Nachkriegszeit im Göttinger Institut zur Verfügung standen.

Das war der Grund, aus dem GUDDEN und ich versuchten, ganz radikal vorzugehen und die Oberfläche des festen Körpers mit allen ihren Unklarheiten völlig auszuschalten. Die abgespaltenen Elektronen sollten von nun an nur noch *im Innern* der festen Körper beobachtet werden. Als geeignetes Material erschienen hochisolierende Krystalle mit eingesprengten oder gelösten fremden Metallatomen. Die an diesen Metallatomen vom Licht abgespaltenen Elektronen sollten sich durch eine Vergrößerung der Dielektrizitätskonstante des Krystalles bemerkbar machen. Es wurde nicht erwartet, die Elektronen als einen „lichtelektrischen Leistungsstrom" im Krystall fassen zu können.

Als erstes Krystallmaterial wurde Zinksulfid mit Kupferzusatz benutzt. Schon der erste Versuch war erfolgreich. Es ergab sich eine Zunahme der Dielektrizitätskonstanten durch Belichtung, eine bisher noch nie beobachtete Erscheinung (12). Außerdem trat etwas ganz Unerwartetes ein: durch den zuvor hochisolierenden ZnS-Krystall flossen „lichtelektrische Ströme" hindurch. Das galt, wie sich bald herausstellte, nicht nur für ZnS mit Cu-Zusatz. Die lichtelektrischen Ströme fanden sich allgemein in allen Krystallen mit hohem optischen Brechungsindex ($n > 2$) (13). Das verhieß im ersten Augenblick eine erfreuliche Vereinfachung des Beobachtungsverfahrens. Aber das war eine große Täuschung: Die beobachteten Ströme zeigten all die unerquicklichen Erscheinungen, die von der Einwirkung des Lichtes auf Selen zur Genüge bekannt sind. Die bei Belichtung beobachteten Ströme waren träge. Sie hingen von der Vorgeschichte ab. Es fehlte Proportionalität zur Lichtenergie und es gab keine Sättigung. Es waren alle Schwierigkeiten vorhanden, deren man bei der Erforschung des Selens trotz jahrzehntelanger Arbeit nicht Herr geworden war. Nur eines stand von Anfang an fest: Der beobachtete Strom bestand sicher *nicht* in der Wanderung der vom Licht primär abgespaltenen Elektronen. Es konnte sich aus vielen Gründen nur um sekundäre Folgeerscheinungen der primären lichtelektrischen Elektronenabspaltung handeln. Es kam nun darauf an, diesen primären Vorgang aus dem Wust der sekundären herauszuschälen. Die Bedingungen erschienen in dieser Hinsicht günstiger als beim Selen. Die Mehrzahl der von uns gefundenen Stoffe waren hervorragende Isolatoren, unter ihnen z. B. der Diamant. Es fehlte also wenigstens der seinem Wesen nach unklare und überdies inkonstante Dunkelstrom der Selenpräparate.

In der Tat gelang es verhältnismäßig rasch, den lichtelektrischen Primärstrom einwandfrei abzutrennen (14). Die Abwanderung der Elektronen, der „negative Primärstromanteil", setzt trägheitslos ein (34). Der Strom ist der Lichtintensität proportional und läßt sich sättigen. Gleichzeitig bewirkt die lichtelektrische Elektronenabspaltung eine Erweiterung des optischen Absorptionsspektrums nach längeren Wellen. — Dem negativen Primärstromanteil folgt hinterher der positive. Er besteht im Einrücken von Ersatzelektronen. Dieser Vorgang wird in zwei Weisen ausgelöst. Erstens durch Wärmebewegung (15). Zweitens durch Absorption solchen langwelligen Lichtes, das in dem zuvor erweiterten Absorptionsspektrum absorbiert wird (16). Der positive Primärstrom stellt elektrisch wie optisch im Innern den Ausgangszustand des Krystalles wieder her.

Sobald das Wesen des Primärstromes klargestellt war, wurde die Ausgangsfrage wieder aufgenommen: Wie hängt die Zahl der Elektronen pro Einheit absorbierter Lichtenergie von der Wellenlänge des Lichtes ab? Die Antwort war: Sie ist in weitem Bereich der Lichtwellenlänge proportional. In etlichen Fällen wurde sogar in Analogie zu WARBURGS photochemischen Befunden das volle „Quantenäquivalent" gefunden, pro Lichtquant ein Elektron (17). — Die Ausschaltung der Oberfläche bei den lichtelektrischen Beobachtungen war nicht erfolglos geblieben.

Aber trotz des wegen seiner Einfachheit erfreulichen Ergebnisses waren GUDDEN und ich im Grunde von unserem ursprünglich beabsichtigten Wege heruntergeraten: Wir hatten den Photo-

effekt an Metallatomen untersuchen wollen, die als Fremdkörper in ein durchsichtiges, isolierendes Gitter eingesprengt sind. Bei den von uns benutzten Krystallen hoher Lichtbrechung waren aber die Zentren der lichtelektrisch wirksamen Lichtabsorption ganz anderer Art gewesen. Es handelt sich bei den Krystallen, wie Diamant, Zinnober usw. um solche Atome bzw. Moleküle, die den *langwelligen Ausläufer* der konstitutionellen Eigenabsorption des Krystalles bedingen. Es müssen solche Atome oder Moleküle sein, deren Eigenfrequenz sich von der der großen Mehrzahl durch Wärmestörungen oder Gitterfehler aller Art unterscheidet. In dem Gebiete hoher Lichtabsorption, also beim Eindringen in die kurzwellige Absorptionsbande selbst, verschwindet die lichtelektrische Leitung (18). Auf diesen Punkt werden wir gegen Schluß zurückkommen.

Inzwischen war die sehr umfangreiche, letzte Arbeit RÖNTGENS erschienen. RÖNTGEN berichtete über Versuche, die er zum Teil gemeinsam mit A. JOFFE ausgeführt hatte (19). RÖNTGEN hatte gefunden, daß durch Röntgenlicht gelb verfärbtes NaCl im Lichte seine Leitfähigkeit um viele Zehnerpotenzen erhöht. Das gleiche hatte RÖNTGEN für natürliches, blaues oder violettes Steinsalz festgestellt, dessen Färbung nach SIEDENTOPFS ultramikroskopische Untersuchungen auf kolloidalen Na-Teilchen beruht (20). Hierauf hatte RÖNTGEN die Auffassung gestützt, daß der von ihm beobachteten Leitfähigkeitsänderung in letzter Linie ein Photoeffekt an den fein verteilten Na-Teilchen zugrunde läge. Traf das zu, so war das von uns ursprünglich erstrebte Krystallmaterial in geeigneter Form gefunden: Ein isolierendes Gitter mit eingesprengtem Natrium, also einem Metall, das als massives Stück sowohl den normalen wie den selektiven Photoeffekt zeigte. Allerdings war zunächst noch ein ganz wichtiger Punkt zu klären: Handelte es sich in diesem gelb verfärbten NaCl nur um sekundäre, dem des Selens ähnliche Leitfähigkeitsänderungen? Dafür sprachen die von RÖNTGEN ausgiebig untersuchten Trägheitserscheinungen, der Einfluß der Vorgeschichte und manches andere. — Oder gelang es, auch bei dem gelb verfärbten NaCl einen lichtelektrischen Primärstrom zu beobachten?

Die erdrückende Fülle des von RÖNTGEN zusammengetragenen Beobachtungsmateriales ließ erst nach geraumer Zeit eine Übersicht gewinnen. Nachdem alle Versuche RÖNTGENS reproduziert worden waren, konnte man in der Tat im gelben NaCl charakteristische Primärstromerscheinungen nachweisen (21): Es fand sich der negative und der positive Primärstromanteil (Abwanderung und Ersatz der Elektronen) und die Erweiterung des optischen Absorptionspektrums nach längeren Wellen bei Belichtung mit lichtelektrisch wirksamem Licht (22). — Die Erscheinungen im blauen und violetten Steinsalz blieben zunächst unverständlich.

Nach Sicherstellung des Primärstromes wurde sogleich die Hauptfrage in Angriff genommen: Gilt die Proportionalität von Elektronenzahl und Wellenlänge (Fig. 1a)? Findet sich das Quantenäquivalent? Dr. GYULAI maß an den gleichen Krystallstücken die spektrale Verteilung von Primärstrom und Lichtabsorption (23). Beide Kurven waren sehr selektiv, die letztere ein wenig gegen die erstere nach kürzeren Wellen verschoben. Die Division beider gab die Zahl der Elektronen pro Einheit absorbierter Lichtenergie als Funktion der Wellenlänge. Als Ergebnis fand Dr. GYULAI eine auf den Wellenlängennullpunkt weisende Gerade. Die Zahl der Elektronen war gemäß Fig. 1a der Wellenlänge proportional. Leider kann man am gelben NaCl im Gegensatz zu Diamant, Zinnober usw. keine Sättigungsströme erreichen. Selbst bei Feldstärken von 70 000 Volt/cm ist noch keine Abweichung vom OHMschen Gesetz erkennbar (24). Es muß daher noch offen bleiben, ob wirklich auf jedes $h\nu$, wie im Diamant, Zinnober usw., *ein* Elektron kommt.

Wieder hatte sich also die radikale Ausschaltung der Oberfläche bei lichtelektrischen Beobachtungen als förderlich erwiesen. Bei den Krystallen mit hoher Lichtbrechung einerseits, dem gelb verfärbten NaCl andererseits handelt es sich um zwei ganz verschiedene Typen der Lichtabsorption. Im ersten Falle ist es der langwellige Ausläufer der konstitutionellen *Eigen*absorption des Krystalles, im zweiten handelt es sich um eine *Fremd*färbung durch eingesprengte Metalle. Trotzdem in beiden Fällen das gleiche Ergebnis: Eine Gültigkeit des Quantenäquivalentsatzes für die Zahl der Elektronen im lichtelektrischen Effekt.

WARBURG hat den Quantenäquivalentsatz für photochemische Gasreaktionen in Einzelfällen bestätigen können. Ebenso dürfte der Satz jetzt für die lichtelektrische Elektronenabspaltung in Einzelfällen gesichert sein. Er scheint als Grenzgesetz unter bestimmten Bedingungen zu gelten.

Welche Bedingungen sind es? Oder in Umkehr der Fragestellung: Welche Umstände verursachen beim Oberflächenphotoeffekt die spektralen Verteilungskurven Fig. 1 b und c, die so gar nicht mit der nach der Quantendeutung erwarteten Fig. 1a vereinbar sind. — Die lichtelektrischen Beobachtungen *im Innern* fester Körper haben auch diese Frage nicht unerheblich geklärt.

Oben wurden bereits NaCl-Krystalle erwähnt, die durch ultramikroskopisch sichtbare Na-Teilchen blau oder violett verfärbt waren. RÖNTGEN hatte auch in ihnen „lichtelektrische Ströme" gefunden. Es wollte aber in keiner Weise gelingen, die Beobachtungen, weder die elektrischen noch die optischen, in das für den lichtelektrischen Primärstrom bewährte Schema einzuordnen. Es blieb nichts, als durch Fortführung der Experimente Aufschluß zu suchen. Diese Experimente wurden in zwiefacher Richtung angesetzt:

Erstens maß Dr. GYULAI (25) an den gleichen Krystallstücken das optische Absorptionsspektrum und die spektrale Verteilung der lichtelektrischen

Ströme. Die Absorptionsspektra zeigten erhebliche individuelle Verschiedenheiten. Die Hauptabsorption lag meist an der Grenze des Ultrarot. Die Zahl der Elektronen pro Einheit absorbierter Lichtenergie (Relativwerte) zeigte stets eine spektrale Verteilung gemäß Fig. 1c. Es kann kaum zweifelhaft sein, daß Dr. GYULAI den selektiven Photoeffekt an den Oberflächen der kolloidalen Na-Teile gemessen hat. Eine Verschiebung des Maximums gegenüber den an Na-Flächen in Vakuumzellen beobachteten findet eine ungezwungene Erklärung in dem Einfluß der Nachbarmoleküle, der oben erwähnt wurde (8).

Zweitens versuchten GUDDEN und ich die Erscheinungen an kolloidal verfärbten Krystallen in grobem Maßstabe nachzumachen (26). Wir überzogen gemäß Fig. 2 die eine polierte Oberfläche einer NaCl-Platte *P* mit einem K-Spiegel, auf die zweite wurde eine durchsichtige Flüssigkeitselektrode *F* aufgesetzt. Die Elektronen sollten von der bestrahlten K-Kathode in den Krystall hineinlaufen. Unser Ziel war eigentlich die Feststellung, ob von außen in das Gitter gebrachte Elektronen im Gitter weiterlaufen können. Aber es kam mal wieder ganz anders. Von einem Eintritt der Elektronen in das Gitter war keine Rede. Das NaCl-Gitter ließ sich ohne weiteres durch Quarz- oder Uvio*lglas* ersetzen. Und dann kam die Hauptsache: Die Elektrizitätsbewegungen waren unabhängig vom Vorzeichen der Kaliumfläche! Es war gleichgültig, ob das Kalium Kathode oder Anode war! Die spektrale Verteilung war durchaus die der Fig. 1c, in bester Übereinstimmung mit der Lage des selektiven Photoeffektes an massiven K-Flächen in Vakuumzellen (27). Ein untergelagerter normaler Photoeffekt wurde nicht gefunden.

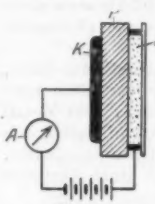


Fig. 2.

Die Befunde ließen nur *eine* Deutung zu. Die Zentren der Lichtabsorption, die hier den selektiven Photoeffekt lieferten, konnten unmöglich der Oberfläche des Kaliumspiegels angehören. Die Elektronen mußten vielmehr von unsichtbaren kleinen K-Teilchen herrühren, die in irgendeiner Zwischenschicht zwischen K-Spiegel und Isolatoroberfläche suspendiert waren. Die Existenz dieser Zwischenschicht ließ sich durch einen einfachen Versuch belegen. Die gesamte lichtelektrische Erscheinung blieb aus, sobald die Isolatoroberfläche vor dem Aufdestillieren des K-Spiegels mit besonderer Sorgfalt getrocknet wurde.

Die beiden soeben beschriebenen Untersuchungsreihen geben nun wohl endlich eine einleuchtende Deutung des selektiven Photoeffektes. Sie ist folgende. ***Die Elektronen des selektiven Photoeffektes entstammen nicht den Atomen oder Molekülen des festen bzw. flüssigen Metalles. Sie entstammen vielmehr dem Metall im Zustande molekularer oder atomarer Verteilung.*** In diesem Zustande befinden sich z. B. Natriumatome

a) suspendiert oder gelöst im NaCl-Gitter, das durch Röntgenlicht oder einen gleichwertigen Eingriff verfärbt ist (gelbes NaCl);

b) suspendiert in einer Grenzschicht zwischen festem Na-Metall und einer Isolatorfläche;

c) adsorbiert an der Oberfläche von ultramikroskopisch sichtbaren Na-Teilchen in Krystallgittern (blaues NaCl);

d) adsorbiert an der Oberfläche festen oder flüssigen Natriummetalles in Vakuumzellen;

e) in den bunten kolloidal verfärbten Schichten, die durch Einwirkung selbständiger Gasentladung auf Natriumhydrür entstehen (ELSTER und GEITELS Photometerzellen) (28);

f) in den bunten, kolloidal verfärbten Schichten, die sich bei Einwirkung sauerstoffabgebender Substanzen auf dem Natrium bilden (8).

Unter d) ist eine adsorbierte Oberflächenschicht, ein zweidimensionaler Dampf an der Oberfläche der festen und flüssigen Phase eingeführt worden. Das ist heutigen Tages alles andere eher als eine ad hoc gemachte Annahme. Es genügt ein Hinweis auf Arbeiten von VOLMER (29), TAMMANN (30) und LANGMUIR (31). Offen ist nur zu lassen, ob außer den Dampfmolekülen des Metalles noch fremde Moleküle beteiligt oder notwendig sind.

Welche Folgerungen ergeben sich aus dieser Vorstellung? Der Kürze halber, wollen wir auch weiterhin Na als Beispiel beibehalten.

Die in Kurve 1c dargestellte Kurve des selektiven Photoeffektes war in der Weise gewonnen worden, daß die Na-Metalloberfläche die Innenfläche eines „schwarzen Körpers" bildete (5). Der Zweck dieser Anordnung war, alles einfallende Licht zur Absorption zu bringen, und so die Zahl der *austretenden* Elektronen pro Einheit absorbierter Lichtenergie zu erhalten. Dies Verfahren hatte Berechtigung, solange man die Zentren des selektiven Photoeffektes mit den Na-Atomen des festen Metalles identifizierte. Heute aber betrachten wir zwar nach wie vor die Na-Atome oder -Moleküle als Zentren des selektiven Photoeffektes, aber nur solche Atome oder Moleküle, die dem festen Metall in einer Adsorptionsschicht als „zweidimensionaler Dampf" vorgelagert sind. Dann erreicht aber die Anordnung des schwarzen Körpers keineswegs mehr ihren Zweck. ***Man mißt mit ihr lediglich auf elektrischem Wege das optische Absorptionsspektrum der adsorbierten Na-Atome bzw. -Moleküle.*** Es ist das gleiche Spektrum[1]), das wir in den atomar gelb verfärbten NaCl-Gittern sowohl elektrisch wie auch optisch ausmessen können. Nur sind die an sich gleichen Spektren unter dem Einfluß der Nachbarmoleküle zu verschiedenen Frequenzen verschoben.

In der adsorbierten Na-Dampfschicht wird nur ein kleiner Bruchteil des einfallenden Lichtes

[1]) Sein Zusammenhang mit den Atomfrequenzen des Na wird in mehreren, noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen behandelt.

absorbiert. Der überwiegende Teil endet ungenutzt in der massiven Metallunterlage. — Noch ist es nicht gelungen, die auf die Adsorptionsschicht entfallende Lichtabsorption zu messen. Sie allein kommt für den selektiven Photoeffekt in Betracht. Sobald man *sie* mit der Zahl der beobachteten Elektronen vergleichen können wird, wird man ohne Zweifel auch für den selektiven Oberflächenphotoeffekt die Kurve 1a erhalten.

Diese Überlegungen bleiben gültig, wenn die massive Na-Unterlage in kleine Stücke unterteilt wird. Diese Unterteilung findet sich in dem durch ultramikroskopisch sichtbare Na-Kolloidpartikel blau verfärbtem NaCl. Sie findet sich weiter in den oben unter e) und f) genannten kolloidalen Schichten. Wir verstehen, warum in allen diesen Fällen der selektive Photoeffekt nach Fig. c beobachtet wird.

Noch ein weiterer, für den selektiven Photoeffekt so charakteristischer Punkt wird verständlich: Der Einfluß des elektrischen Lichtvektors. Er wurde bereits oben erwähnt. In allen Fällen, in denen das Metall einen optischen Spiegel bildet, tritt der selektive Effekt nur auf, wenn das einfallende Licht eine zur Spiegeloberfläche senkrecht schwingende Komponente hat. Man hat lediglich anzunehmen, daß die adsorbierten Na-Atome bzw. -Moleküle relativ zur spiegelnden Unterlage *orientiert* sind. Eine derartige Orientierung ist ja von LANGMUIR für zahlreiche Moleküle einwandfrei erwiesen worden. Bei orientierten Molekülen ist es ohne weiteres möglich, daß sie kein Licht absorbieren können, dessen Vektor parallel zur Spiegelunterlage schwingt. Anschaulich würde das heißen, daß in den durch Adsorption am Spiegel orientierten Molekülen keine Elektronen parallel zur Spiegelebene schwingen oder kreisen. Die experimentelle Prüfung dieser Auffassung ist nur deswegen nicht einfach, weil die Absorption des Lichtes in der Grenzschicht klein gegen die in der Unterlage ist.

Sehr zugunsten dieser Auffassung sprechen Beobachtungen von IVES (32). IVES findet, daß Alkalimetalle, die sich in Form unsichtbarer, vielleicht monomolekularer Schichten auf Spiegeln aus beliebigen Metallen befinden, die bekannte Vorzugsstellung des elektrischen Lichtvektors zeigen[1]). — Soweit der selektive Photoeffekt.

Dann der normale Photoeffekt. Warum läuft die Kurve seiner spektralen Verteilung der Quantengeraden in Fig. 1a so sehr zuwider? — Früher hat man die Kurve 1b durch Elektronenverluste beim Passieren der Oberfläche zu deuten versucht (36). Es sollte zwar für jedes PLANCKsche $h\nu$ ein Elektron kinetische Energie erhalten, aber auf dem Wege zur und durch die Oberfläche stecken bleiben. Es schien einleuchtend, daß diese Verluste für lange Wellen, also kleine Energien besonders groß waren.

Inzwischen sind die Erscheinungen des lichtelektrischen Primärstromes in Krystallen gefunden worden. Seitdem stehen GUDDEN und ich der früheren Auffassung skeptisch gegenüber: Sie bedarf zum mindesten einer wesentlichen Ergänzung.

Wann gelangen in Krystallen Elektronen in der bei quantenhafter Absorption zu fordernden Zahl und Wellenlängenabhängigkeit zur Beobachtung? Nur in 2 Fällen:

1. In Krystallen mit Eigenfärbungen nur im langwelligen Ausläufer des Absorptionsgebietes (17). In *diesem* Gebiete absorbieren nur solche Moleküle, die durch Wärmestörungen oder andere Gitterfehler vor der großen Masse ausgezeichnet sind. Ein *ideales, fehlerfreies* Krystallgitter wird beim absoluten Nullpunkt sicher keine Elektronen mehr beobachten lassen, weil alle Moleküle gleichartig absorbieren.

2. In Krystallen mit Fremdfärbung nur dann, wenn die Färbung von *molekular* verteilten oder gelösten fremden Molekülen herrührt. Das Metall kann sich nicht einmal zu ultramikroskopisch gerade nachweisbaren Partikeln zusammenballen, ohne daß die Elektronenausbeute stark herunter geht.

In beiden Fällen sind die absorbierenden Moleküle weit von ihresgleichen getrennt. Es kann keine Wechselwirkung mit benachbarten, gleichartigen Absorptionszentren eintreten: Das allein scheint die Bedingung zu sein, unter der ein in einem festen Körper absorbiertes $h\nu$ als kinetische Energie eines einzelnen Elektrons erhalten bleibt. Dann dürfte entsprechend ein ideales Metallgitter überhaupt keinen Oberflächenphotoeffekt zeigen. Ein solcher könnte erst auftreten, wenn einzelne Moleküle irgendwie vor der Mehrzahl ausgezeichnet sind, etwa durch die Nachbarschaft fremder Moleküle mit ganz anderen Eigenfrequenzen. Es war eingangs erwähnt, daß man bereits 1913 durch Oberflächenänderungen die spektrale Verteilung des normalen Photoeffektes um eine Oktave verschieben konnte, vom Ultrarot ins Ultraviolett und umgekehrt (7). Inzwischen hat man die Beispiele für diese Verschiebungen, vor allem weit ins Ultraviolett hinein, stark vermehrt (33). Die Einzelheiten bleiben noch zu erforschen, der Gedanke, nach der *Auszeichnung einzelner Moleküle* zu suchen, wird schon seine Fruchtbarkeit erweisen.

Die Auffassung, die dem idealen Metallgitter jeden Oberflächenphotoeffekt aberkennt, wird als extrem gelten. Auch wird man ihr die Beobachtungen im Röntgenlicht entgegenhalten. Aber zu Unrecht. Im Röntgenlicht ist die wesentliche Vorbedingung für das Auftreten einzelner Elektronen als Ergebnis eines $h\nu$-Prozesses stets erfüllt. Die absorbierenden Elektronen stehen fern

[1]) Daß IVES nicht gleichzeitig die selektiven Maxima in der gewohnten Spektralgegend findet, *kann* durch den Einfluß der Unterlage gedeutet werden. Der große Einfluß der Nachbarmoleküle auf die Lage des Maximums ist ja seit 13 Jahren immer wieder betont worden. Immerhin bleibt es möglich, daß es auch orientierte, monomolekulare Schichten mit dem metallischen, nicht selektiven optischen Absorptionsspektrum gibt.

von den Elektronen der Nachbarn *im Inneren* der Atome. Günstig wird auch die Kleinheit der Wellenlänge den Abständen gegenüber sein. Herr GUDDEN wird diese Dinge in seiner demnächst erscheinenden Monographie der lichtelektrischen Erscheinungen umfassender behandeln.

Vor etlichen Jahren schienen die Beobachtungen des Oberflächenphotoeffektes in einem trostlosen Chaos zu enden. Der lichtelektrische Primärstrom im Innern der Krystalle hat durch gänzliche Ausschaltung der unklaren Oberflächenverhältnisse inzwischen die quantenhafte Lichtabsorption im festen Körper besser kennen lernen lassen. Man kennt die Bedingungen, unter denen die $h\nu$-Energie eines Elementarprozesses einem einzelnen Elektron erhalten bleibt. Die letzten Ausführungen sollten kurz andeuten, daß diese Bedingungen auch die Erscheinungen des Oberflächenphotoeffektes, und zwar des selektiven mehr als die des normalen, in großen Zügen verstehen lassen.

Literatur:

1. A. EINSTEIN, Ann. d. Phys. (4) **17**, 132. 1905.
2. Literaturzusammenstellung: RUDOLF LADENBURG, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **17**, 93. 1920.
3. R. POHL und P. PRINGSHEIM, Verhandl. d. dtsch. physikal. Ges. **12**, 682. 1910.
4. K. FARWIG, Zeitschr. f. Phys. **21**, 38. 1924. R. DÖPEL, Zeitschr. f. Phys. **33**, 237. 1925.
5. R. POHL und P. PRINGSHEIM, Verhandl. d. dtsch. physikal. Ges. **15**, 173. 1913.
6. R. POHL und P. PRINGSHEIM, Die Lichtelektrischen Erscheinungen. Vieweg 1914. S. 24, 42, 98.
7. R. POHL und P. PRINGSHEIM, Verhandl. d. dtsch. physikal. Ges. **15**, 637. 1913.
8. R. POHL und P. PRINGSHEIM, Verhandl. d. dtsch. physikal. Ges. **15**, 625. 1913.
9. R. POHL und P. PRINGSHEIM, Verhandl. d. dtsch. physikal. Ges. **14**, 46. 1912.
10. G. WIEDMANN, Verhandl. d. dtsch. physikal. Ges. **18**, 333. 1916.
11. E. WARBURG, Sitzungsber. d. preuß. Akad. d. Wiss. **12**, 314. 1916; **16**, 300. 1918.
12. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **1**, 365. 1920.
13. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **16**, 170. 1923.
14. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **7**, 65. 1921.
15. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **21**, 1. 1924.
16. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **30**, 14. 1924.
17. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **17**, 331. 1923.
18. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **18**, 199. 1923. WERNER HEINTZE, Zeitschr. f. Phys. **15**, 339. 1923.
19. W. C. RÖNTGEN, Ann. d. Phys. (4) **64**, 1. 1921.
20. H. SIEDENTOPF, Phys. Zeitschr. **6**, 855. 1905.
21. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **31**, 651. 1925.
22. Z. GYULAI, Zeitschr. f. Phys. **33**, 251. 1925.
23. Z. GYULAI, Zeitschr. f. Phys. **32**, 103. 1925.
24. J. BINGEL, Zeitschr. f. Phys. **21**, 229. 1924. A. FRUM, Dissertation Göttingen, Kaestners Universitätsbuchdruckerei 1925.
25. Z. GYULAI, Zeitschr. f. Phys. **35**, 411. 1925/26.
26. B. GUDDEN und R. POHL, Zeitschr. f. Phys. **34**, 245. 1925.
27. R. POHL und P. PRINGSHEIM, Verhandl. d. dtsch. physikal. Ges. **12**, 349. 1910.
28. J. ELSTER und H. GEITEL, Phys. Zeitschr. **11**, 257. 1910.
29. A. VOLMER, Zeitschr. f. Phys. **7**, 13. 1921; **35**, 170. 1925.
30. G. TAMMANN, Zeitschr. f. anorgan. Chem. **130**, 87. 1923.
31. Jrv. LANGMUIR, Transact. of Faraday Soc. **17**, 3. 1921.
32. H. E. IVES und A. L. JOHNSRUD, Astrophys. journ. **40**, 209, 231. 1924.
33. RUD. SUHRMANN, Ann. d. Phys. **67**, 43. 1922.
34. W. FLECHSIG, Zeitschr. f. Phys. **33**, 372. 1925.

Beitrag zur Aufklärung der „Subelektronen".

(Unter Benutzung von Versuchen Herrn R. SANZENBACHERS.)

Von ERICH REGENER, Stuttgart.

Zur Frage nach der Ursache für die zu kleinen Ladungen (Subelektronen), welche nach Herrn EHRENHAFT an kleinen Nebelteilchen gefunden werden, habe ich schon früher die Ansicht ausgesprochen[1]), daß es vorteilhaft sein müsse, systematische Ladungsmessungen über ein großes Intervall der Teilchengröße vorzunehmen. Denn Unterschreitungen der Elementarladung werden nur an kleinen Teilchen (Radius bei 10^{-5} cm und darunter) gefunden, während große Teilchen den Elementarwert Herrn MILLIKANS zeigen. Aus der Lage des Übergangsgebietes und seiner Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen sollte man also Aufschlüsse über die Natur der Störung der Ladungsmessungen erwarten. Aus solchen Messungen Herrn RADELS[1]) habe ich dann auf eine, das Teilchen umgebende Schicht verdichteten Gases geschlossen, deren Einfluß bei großen Teilchen zu vernachlässigen ist, die aber bei *kleinen* Teilchen die Beweglichkeit und damit auch die Ladung zu gering erscheinen läßt. Spätere Messungen Herrn KÖNIGS[2]) an Teilchen in Luft und Kohlensäure, über die auch in dieser Zeitschr.[3]) berichtet wurde, waren mit der Annahme einer verdichteten Gasschicht im großen und ganzen im Einklang. Diese Messungen erstreckten sich hauptsächlich auf Quecksilberteilchen, denn nur an flüssigen Teilchen kann die Oberflächenschicht *rein* in Wirk-

[1]) Berlin. Ber. **32**, 632. 1920.

[1]) E. RADEL, Zeitschr. f. Phys. **3**, 63. 1920.
[2]) M. KÖNIG, Zeitschr. f. Phys. **11**, 253. 1922.
[3]) E. REGENER, Naturwissenschaften **11**, 17. 1923.

samkeit treten, da an festen Teilchen nach den Untersuchungen Herrn BÄRS[1]) andere Ursachen, wie nichtkugelförmige Gestalt und flockige Struktur, die Hauptursache für die Abweichungen geben können.

Die erwähnten Messungen der Herren RADEL und KÖNIG sind aus der eingangs erwähnten Absicht an einer großen Zahl Teilchen verschiedenster Größe ausgeführt worden. Seit längerer Zeit erschien es mir aber wünschenswert, den Übergang aus dem „Elementarquantumgebiet" mit normalen Ladungen in das „Gebiet der Subelektronen", den sog. kritischen Teilchenradius, durch Beobachtung an einem einzelnen Teilchen dadurch festzulegen, daß das geladene Teilchen *verdampft* und infolgedessen automatisch aus dem Elementarquantgebiet in das Subelektronengebiet übergeht. Quecksilberteilchen bekommt, und eine große Reihe von Ladungsmessungen ausgeführt, die sehr bemerkenswerte Resultate ergeben haben, über die hier kurz berichtet werden soll[1]).

Die Erzeugung der Quecksilberteilchen geschah bei früheren Beobachtern meist durch *vorsichtiges* Erwärmen eines kleinen Quecksilbervorrates. Sehr bald bildet sich dann ein Nebel, der aus feinen Quecksilbertröpfchen besteht. Nach den Beobachtungen SANZENBACHERS sind die so erhaltenen Quecksilberteilchen solche, die entweder vollkommen stabil sind oder nur sehr wenig ihre Masse verändern. Läßt man diesen feinen stabilen Nebel abziehen, so erhält man bei stärkerem Erhitzen meist etwas größere Tröpfchen, die die Erscheinung des Verdampfens in sehr starkem Maße zeigen. Will man an solchen Teilchen die Ladung messen,

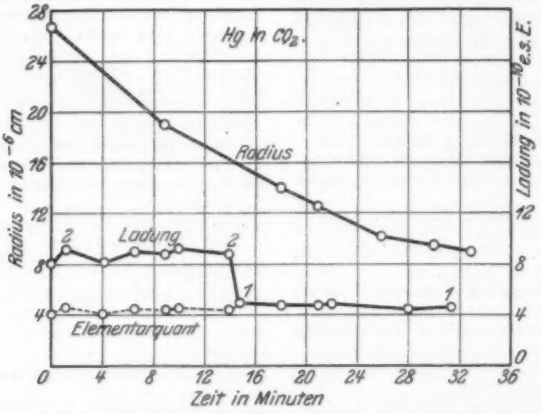


Fig. 1. Radius und Ladung eines verdampfenden Hg-Teilchens in CO_2.

Denn bei der Beobachtung vieler Teilchen können die Eigenschaften der einzelnen Teilchen aus nicht kontrollierbaren Ursachen schwanken (die Beobachtung bestätigt dies), und das Übergangsgebiet kann infolgedessen nicht mit der wünschenswerten Schärfe festgelegt werden. In der Tat zeigt der kritische Teilchenradius in den Arbeiten von RADEL, KÖNIG und auch von WASSER[2]) erhebliche Streuung und ist nur in grober Annäherung bestimmbar. Diese Streuung sollte bei einem individuellen Teilchen, das durch Verdampfung immer kleiner wird, fortfallen.

Verdampfende Teilchen sind schon von einer Reihe von Beobachtern erhalten worden. Die Verdampfung wurde meist als störend empfunden, von EHRENHAFT bei Quecksilberteilchen durch Zusatz von Blei sogar beseitigt. Herr R. SANZENBACHER hat nun auf meine Veranlassung die Bedingungen studiert, unter denen man auch stark verdampfende so erzeugt man sie am besten durch stärkeres Erhitzen eines kleinen Quecksilbervorrates in der Ausbuchtung eines kleinen Röhrchens unmittelbar vor der Meßkammer. Störungen durch erhöhte Temperatur des die Quecksilberteilchen mitführenden Gases sind dann praktisch bedeutungslos, man erhält aber Teilchen, welche unter Umständen im Laufe einer halben Stunde 99% ihrer Masse und mehr durch Verdampfen verlieren können.

Die Ladungsmessungen SANZENBACHERS zeigen nun einen großen Unterschied zwischen den stabilen, durch vorsichtiges Erwärmen erhaltenen und den verdampfenden Teilchen. Die stabilen Quecksilberteilchen ergeben nämlich, wenn sie genügend klein sind, in Übereinstimmung mit den früheren Beobachtern Unterschreitungen der Elementarladung, während die stark verdampfenden Teilchen den Elementarwert meist behalten, auch wenn sie durch Verdampfen in das Subelektronengebiet der kleinen Radien gekommen sind. Da die

[1]) Vgl. R. BÄR, Naturwissenschaften 10, 322 und 344. 1922.

[2]) E. WASSER, Zeitschr. f. Phys. 27, 22.6. 1924

[1]) Näheres siehe in der demnächst erscheinenden Dissertation SANZENBACHERS.

Erscheinungen in den drei untersuchten Gasen, Kohlensäure, Luft und Wasserstoff, etwas verschieden verlaufen, seien sie für jedes Gas besonders beschrieben.

Fig. 1 gibt das typische Verhalten eines stark verdampfenden Teilchens in Kohlensäure wieder. Der Radius geht in etwa 34 Minuten von 26,69 auf $8{,}91 \cdot 10^{-6}$ cm (entsprechend einem Massenverlust von 96%) herunter. Die Elementarladung (in der ersten Hälfte der Beobachtung aus der doppelten Ladung repartiert) bleibt innerhalb der Beobachtungsfehler vollkommen konstant auf dem Elementarwert[1]), während sowohl von KÖNIG[2]) wie von WASSER[3]) bereits unterhalb des Radius $20 \cdot 10^{-6}$ cm Subelektronen gefunden wurden. Dieses Verhalten ist bei verdampfenden Quecksilberteilchen in Kohlensäure die Regel. Unter 55 verdampfenden Quecksilberteilchen hat SANZENBACHER nur *eines* gefunden, bei dem die Ladung mit sinkendem Radius nicht konstant war, sondern langsam auf $2{,}5 \cdot 10^{-10}$ e. s. E. herabging. Auch in feuchter Kohlensäure blieb bei 40 verdampfenden Quecksilberteilchen die Ladung konstant auf dem Elementarwert.

In Luft ergaben sich die gleichen Verhältnisse wie in Kohlensäure, doch konnten häufiger Quecksilberteilchen beobachtet werden, welche auch *anwachsen*. Die Ursache für das Verdampfen oder Anwachsen der Teilchen ist offenbar in der Anwesenheit *weiterer* größerer oder kleinerer Teilchen in der Beobachtungskammer zu suchen, welch letztere augenscheinlich aber *auch* durch stärkeres Erhitzen des Quecksilbervorrates erzeugt sein müssen, d. h. keine *stabilen* sein dürfen, bei denen der Verdampfungs- bzw. Kondensationsvorgang wahrscheinlich gestört ist. Sind noch kleinere

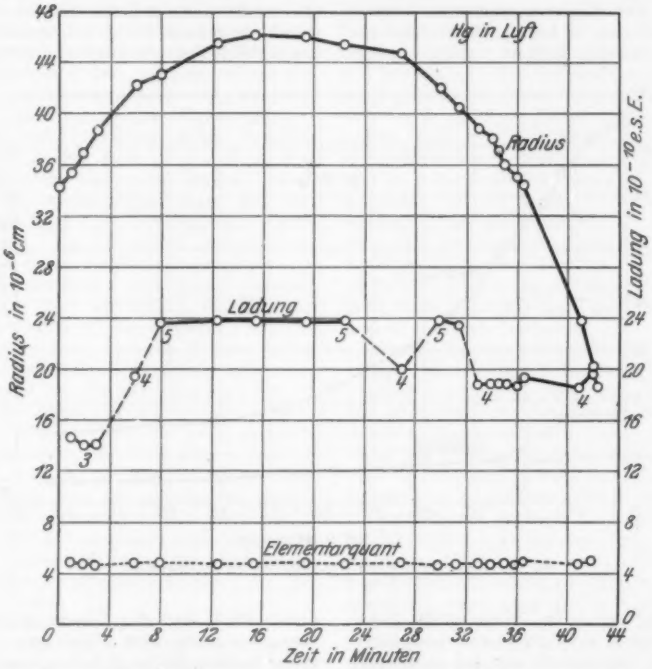


Fig. 2. Erst wachsendes, später verdampfendes Hg-Teilchen in Luft.

Teilchen als das Beobachtungsteilchen in der Kammer, so haben diese nach der bekannten THOMSONschen Formel einen höheren Dampfdruck, und das beobachtete Teilchen wächst, bei Anwesenheit größerer Teilchen tritt das Umgekehrte ein. Fig. 2 zeigt ein Quecksilberteilchen in Luft, das erst (durch Aufzehrung kleinerer Teilchen) wächst, später verdampft (bis auf 6% seiner maximalen Masse). Die auf den Elementarwert repartierte Ladung bleibt auch hier vollkommen konstant. Bei der Berechnung bewährte sich das von MATTAUCH[1]) angegebene Verfahren der experimentellen Ermittelung des Faktors A in der STOKES-CUNNINGHAMschen Formel. Für das Teilchen der

[1]) Mit. $A = 0{,}815$ in der STOKES-CUNNINGHAMschen Formel.
[2]) l. c. [3]) l. c.

[1]) J. MATTAUCH, Zeitschr. f. Phys. **32**, 439. 1925.

Fig. 2 ergibt sich so der Mittelwert $e = 4{,}73 \cdot 10^{-10}$ e. s. E. Unter Benutzung eines konstanten Faktors A hätte sich ein leichtes Anwachsen der Ladung mit abnehmendem Radius ergeben.

In Wasserstoff trat das Konstantbleiben der Ladung[1]) mit abnehmendem Radius nur etwa bei der Hälfte der beobachteten verdampfenden Quecksilberteilchen ein. Die Erscheinung, daß die Ladung mit sinkendem Radius abnahm, die in Luft und Kohlensäure nur sehr selten zu beobachten war, trat hier also häufiger auf. Fig. 3 gibt ein Beispiel für einen solchen Fall. Hier ist also trotz des Verdampfens noch eine störende Ursache vorhanden, welche das Kleinerwerden der Ladung vortäuscht. Auch den in Fig. 3 eingezeichneten Werten für die Radien kommt natürlich keine reelle Bedeutung zu. In Wasserstoff liegen also die Verhältnisse insofern etwas komplizierter, als hier im allgemeinen nur bei sehr stark verdampfenden Teilchen normale e-Werte erhalten werden.

Aus den vorliegenden Messungen SANZENBACHERS ergibt sich, daß der Störungseffekt, welcher bei kleinen Quecksilberteilchen Ladungsunterschreitungen, falsche Radien und Dichten vortäuscht, bei Quecksilberteilchen, welche ihre Oberfläche durch Verdampfen oder Kondensieren rasch erneuern, nicht oder wenigstens in stark abgeschwächtem Maße auftritt. Es scheint mir das ein Beweis dafür zu sein, daß die von mir vertretene Ansicht, daß die Störung der Ladungsmessungen in der Oberflächenschicht des Teilchens zu suchen ist, richtig ist. Dabei mag es dahingestellt bleiben, ob diese Oberflächenschicht nur aus adsorbiertem Gase besteht[1]), oder ob noch andere Eigenschaften der Oberflächenschicht eine Rolle spielen. Zeigen doch die letzten interessanten Untersuchungen VOLMERS[2]), daß unsere Kenntnis über die Eigenschaften der Oberflächenschichten noch keineswegs abgeschlossen ist.

Die Messungen SANZENBACHERS lassen natürlich auch viele früheren Messungen unter einem neuen Gesichtspunkte erscheinen. Nachdem durch dieselben gezeigt worden ist, daß zwei Arten von Quecksilberteilchen beim Verdampfen entstehen, wobei die Subelektronen im wesentlichen nur bei den stabilen Teilchen auftreten, erscheint es selbstverständlich, daß das Übergangsgebiet vom Elementarquantum zum Subelektron, der sog. kritische Radius, in den Arbeiten von RADEL, KÖNIG und WASSER nur mit großer Streuung gefunden werden konnte. Auch MATTAUCH[3]) hat bei Quecksilberteilchen Schwierigkeiten gehabt, experimentell ein Widerstandsgesetz zu bestimmen, ja er teilt sogar nach ihrem Verhalten zum Widerstandsgesetz die Teilchen in zwei Gruppen ein. Auch diese Schwierigkeiten werden durch die SANZENBACHERschen Versuche aufgeklärt.

Ein weiteres Nebenresultat der SANZENBACHERschen Messungen ist das Ergebnis, daß auch bei kleinen Quecksilberteilchen, wo sonst Subelektro-

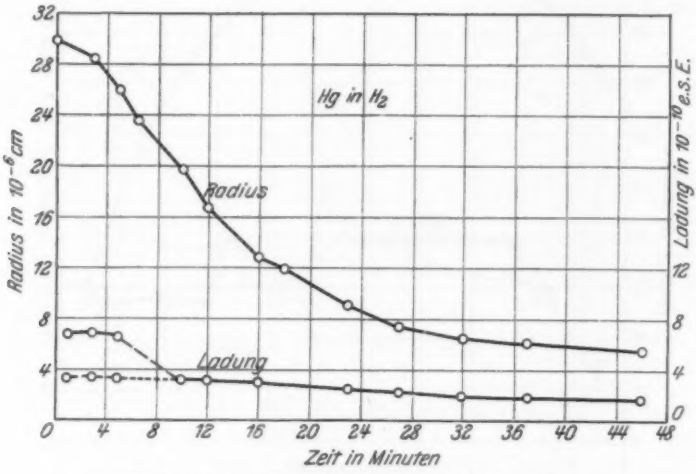


Fig. 3. Verdampfendes Hg-Teilchen in Wasserstoff.

[1]) Ein Anwachsen der Ladung mit abnehmendem Radius wurde dabei gleich Konstantbleiben gesetzt, da für eine im Faktor A nach MATTAUCH korrigierte Formel bei Wasserstoff noch nicht genug Material vorliegt.

[1]) Einwände dagegen siehe bei E. WASSER, Zeitschr. f. Phys. **27**, 226. 1924.

[2]) Z. B. VOLMER und ADHIKARI, Zeitschr. f. Phys. **35**, 170. 1926.

[3]) J. MATTAUCH, l. c.

nen gefunden werden, normale e-Werte gefunden werden, wenn stark verdampfende Teilchen genommen werden. Da wohl kaum behauptet werden kann, daß der Ladungswert der Teilchen in Wirklichkeit vom Verdampfungsprozeß beeinflußt werde, so können natürlich diese Messungen auch als ein erneuter Beweis für die Nichtexistenz des Subelektrons herangezogen werden.

Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes.

Von A. EINSTEIN, Berlin.

Es ist allgemein bekannt, daß Wasserläufe die Tendenz haben, sich in Schlangenlinien zu krümmen, statt der Richtung des größten Gefälles des Geländes zu folgen. Ferner ist den Geographen wohlbekannt, daß die Flüsse der nördlichen Erdhälfte die Tendenz haben, vorwiegend auf der rechten Seite zu erodieren; Flüsse auf der Südhälfte verhalten sich umgekehrt (BAERsches Gesetz). Versuche zur Erklärung dieser Erscheinungen liegen in großer Zahl vor, und ich bin nicht sicher, ob dem Fachmann irgend etwas, was ich hierüber im folgenden sage, neu ist; Teile der darzulegenden Überlegungen sind jedenfalls bekannt. Da ich jedoch niemand gefunden habe, der die in Betracht kommenden ursächlichen Zusammenhänge vollständig gekannt hätte, halte ich es doch für richtig, dieselben im folgenden kurz qualitativ darzulegen.

Zunächst ist es klar, daß die Erosion desto stärker sein muß, je größer die Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar an dem betreffenden Ufer ist, bzw. je steiler der Abfall der Strömungsgeschwindigkeit zu Null hin an einer ins Auge gefaßten Stelle der Flußwandung ist. Dies gilt unter allen Umständen, gleichgültig ob die Erosion auf mechanischer Wirkung oder auf physikalisch-chemischen Faktoren (Auflösung von Bodenbestandteilen) beruht. Wir haben daher unser Augenmerk auf diejenigen Umstände zu richten, welche die Steilheit des Geschwindigkeits-Abfalles an der Wandung beeinflussen.

In beiden Fällen beruht die Asymmetrie bezüglich des ins Auge zu fassenden Geschwindigkeitsgefälles indirekt auf der Ausbildung eines Zirkulationsvorganges, auf den wir zunächst unser Augenmerk richten wollen. Ich beginne mit einem kleinen Experiment, das jeder leicht wiederholen kann.

Es liege eine mit Tee gefüllte Tasse mit flachem Boden vor. Am Boden sollen sich einige Teeblättchen befinden, die dadurch am Boden festgehalten sind, daß sie etwas schwerer sind als die von ihnen verdrängte Flüssigkeit. Versetzt man die Flüssigkeit mit einem Löffel in Rotation, so sammeln sich die Teeblättchen alsbald in der Mitte des Bodens der Tasse. Der Grund dieser Erscheinung ist folgender: Durch die Drehung der Flüssigkeit wirkt auf diese eine Zentrifugalkraft. Diese würde an sich zu keiner Modifikation der Strömung der Flüssigkeit Veranlassung geben, wenn diese rotierte wie ein starrer Körper. Aber in der Nähe der Wandung der Tasse wird die Flüssigkeit durch die Reibung zurückgehalten, so daß sie dort mit geringerer Winkelgeschwindigkeit umläuft als an anderen, mehr im Innern gelegenen Stellen. Im besonderen wird die Winkelgeschwindigkeit des Umlaufens und damit die Zentrifugalkraft in der Nähe des Bodens geringer sein als in größerer Höhe. Dies wird zur Folge haben, daß sich eine Zirkulation der Flüssigkeit von dem in Fig. 1 dargestellten Typus ausbildet, die so lange anwächst, bis sie unter der Wirkung der Bodenreibung stationär geworden ist. Die Teeblättchen werden durch diese Zirkulationsbewegung nach der Mitte der Tasse mitgenommen und dienen zu deren Nachweis.

Fig. 1.

Analog ist es bei einem Flusse, der eine Krümmung erleidet (Fig. 2). In allen Querschnitten des Flußlaufes wirkt, wo dieser gebogen ist, eine nach der Außenseite der Biegung (von A nach B) gerichtete Zentrifugalkraft. Diese ist aber in der Nähe des Bodens, wo die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers durch Reibung reduziert ist, kleiner als in größerer Höhe über dem Boden. Dadurch bildet sich eine Zirkulation aus von der in der Figur angedeuteten Art. Aber auch da, wo keine Flußbiegung vorhanden ist, wird sich eine Zirkulation von der in Fig. 2 dargestelltenArt ausbilden, wenn auch nur in schwachem Betrage, und zwar unter dem Einfluß der Erddrehung. Diese bewirkt nämlich eine quer zur Strömungsrichtung gerichtete Corioliskraft, deren nach rechts gerichtete Horizontalkomponente pro Masseneinheit der Flüssigkeit $2\,v\Omega\sin\varphi$ beträgt, wenn v die Strömungsgeschwindigkeit, Ω die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde und φ die geographische Breite bedeutet. Da die Bodenreibung eine Abnahme dieser Kraft nach dem Boden hin bewirkt, so veranlaßt auch diese Kraft eine Zirkulationsbewegung von der in Fig. 2 angedeuteten Art.

Nach dieser vorbereitenden Überlegung kommen wir zurück auf die Frage der Geschwindigkeitsverteilung im Flußquerschnitt, welche ja für die Erosion maßgebend ist. Zu diesem Zweck müssen wir uns zuerst vergegenwärtigen, wie die (turbulente) Geschwindigkeitsverteilung in einem Flusse zustande kommt und aufrecht erhalten wird. Würde das vorher ruhende Wasser eines Flußlaufes durch Anbringen eines gleichmäßig

verteilten beschleunigenden Kraftimpulses plötzlich in Bewegung gesetzt, so würde die Verteilung der Geschwindigkeit über den Querdurchschnitt zunächst eine gleichmäßige sein. Erst allmählich würde sich durch den Einfluß der Wandreibung eine Geschwindigkeitsverteilung herstellen, bei welcher die Geschwindigkeit von den Wandungen aus nach dem Innern des Strömungsquerschnittes hin allmählich zunimmt. Eine Störung dieser (im groben Mittel) stationären Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt würde sich (unter dem Einfluß der Flüssigkeitsreibung) nur langsam wieder ausgleichen. Die Hydrodynamik veranschaulicht den Vorgang der Einstellung jener

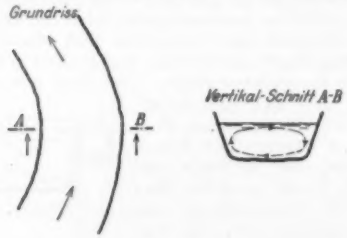


Fig. 2.

stationären Geschwindigkeitsverteilung in folgender Weise. Bei gleichmäßiger Strömungsverteilung (Potential-Strömung) sind alle Wirbelfäden an der Wandung konzentriert. Sie lösen sich los und bewegen sich langsam gegen das Innere des Flüssigkeitsquerschnittes vor, indem sie sich auf eine Schicht wachsender Dicke verteilen. Dabei nimmt das Geschwindigkeitsgefälle an der Wandung langsam ab. Unter der Wirkung der inneren Reibung der Flüssigkeit werden die Wirbelfäden im Innern des Flüssigkeitsquerschnittes langsam aufgezehrt und durch solche ersetzt, welche sich an der Wand neu bilden. So entsteht eine quasistationäre Geschwindigkeitsverteilung. Wesentlich für uns ist es, daß der Ausgleich der Geschwindigkeitsverteilung zur stationären Geschwindigkeitsverteilung hin ein langsamer Prozeß ist. Hierauf beruht es, daß bereits relativ geringfügige, stetig wirkende Ursachen die Verteilung der Geschwindigkeit über den Querschnitt erheblich zu beeinflussen vermögen.

Nun überlegen wir, was für einen Einfluß die durch eine Flußbiegung oder durch die Corioliskraft bewirkte, in Fig. 2 dargestellte Zirkulationsbewegung, auf die Geschwindigkeitsverteilung über den Flußquerschnitt haben muß. Die am raschesten bewegten Flüssigkeitsteilchen werden am weitesten von den Wandungen entfernt sein, also sich im oberen Teile über der Bodenmitte befinden. Diese raschesten Teile der Flüssigkeit werden durch die Zirkulation zur rechten Seitenwandung getrieben, während umgekehrt die linke Seitenwandung Wasser erhält, welches aus der Gegend nahe dem Boden stammt und eine besonders kleine Geschwindigkeit hat. Deshalb muß auf der rechten Seite (im Falle der Fig. 2) die Erosion stärker sein als auf der linken Seite. Man beachte, daß diese Erklärung wesentlich darauf beruht, daß die langsame Zirkulationsbewegung des Wassers darum einen erheblichen Einfluß auf die Geschwindigkeitsverteilung hat, weil auch der dieser Folge der Zirkulationsbewegung entgegenwirkende Ausgleichsvorgang der Geschwindigkeiten durch innere Reibung ein langsamer Vorgang ist.

Damit haben wir die Ursache der Mäanderbildung aufgeklärt. Aber auch gewisse Einzelheiten lassen sich ohne Mühe folgern. Die Erosion wird nicht nur an der rechten Seitenwand, sondern auch noch auf dem rechten Teil des Bodens verhältnismäßig groß sein müssen, so daß die Neigung bestehen wird, ein Profil von der in Fig. 3 angegebenen Gestalt zu bilden. Ferner wird das Wasser an die Oberfläche von der linken Seitenwand geliefert werden, also (besonders auf der linken Seite) an der Oberfläche weniger rasch bewegt sein als das Wasser in etwas größerer Tiefe; dies hat man tatsächlich beobachtet. Ferner ist zu beachten, daß die Zirkulationsbewegung Trägheit besitzt. Die Zirkulation wird also erst hinter der Stelle der größten Biegung ihren maximalen Betrag erlangen, ebenso natürlich die Asymmetrie der Erosion. Dadurch wird im Verlaufe der Erosionsbildung ein Vorschreiten der Wellenlinien der Mäanderbildung im Sinne der Strömung stattfinden müssen. Endlich wird die Zirkulationsbewegung desto langsamer durch Reibung aufgezehrt werden, je größer der Flußquerschnitt ist; es wird also die Wellenlänge der Mäanderbildung mit dem Flußquerschnitt wachsen.

Fig. 3.

Herausgeber und verantwortlicher Schriftleiter: Dr.-Ing. e. h. DR. ARNOLD BERLINER, Berlin W 9.
Verlag von Julius Springer in Berlin W 9. — Druck der Spamerschen Buchdruckerei in Leipzig.